

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE
BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS ELABORADOS A PARTIR DE BIOMASA
AGROINDUSTRIAL Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE
CÓRDOBA.**



ELIAS RICARDO DURANGO PADILLA

JHON LUIS OQUENDO LÓPEZ.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA, CÓRDOBA

2016.

**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE
BIOCOMBUSTIBLES SOLIDOS ELABORADOS A PARTIR DE BIOMASA
AGROINDUSTRIAL Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE
CÓRDOBA.**

ELIAS RICARDO DURANGO PADILLA

JHON LUIS OQUENDO LÓPEZ

**Trabajo de grado presentada, en la modalidad de Investigación y/o Extensión,
como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

Director (s):

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO, Ph.D.

ADRIAN ENRIQUE AVILA GOMEZ, Ph.D.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA, CÓRDOBA

2016.

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

Artículo 61, acuerdo N.º 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A mi país, a mis padres Blanca Padilla y Elias Durango por todo el cariño y amor brindado durante todos estos años, a mis hermanas Sandra y Mara por las complicidades y apoyo en los momentos más difíciles, a mi sobrina hermosa sobrina Taliana María porque es una dulzura y fuente de mis alegrías.

A todos mis amigos y compañeros de la universidad que también me apoyaron para seguir adelante y cumplir esta meta, a todos ellos mis más sinceros agradecimientos.

Elías Ricardo Durango Padilla

DEDICATORIA

A Dios toda las gracias por haberme permitido cumplir esta gran etapa de mi vida, a mis padres Inés Silva y Alcibiades Echeverría por todo el apoyo y cariño que me han brindado a lo largo de todos los años que he estado con ellos y todos los sacrificios que han pasado para poder lograr todas mis metas, que me he propuesto en la vida, a mi madre Angélica López, mi padre Robert Oquendo, mis hermanos Robert, Alí, Karina, Rafael, Erik y Sara porque siempre me dieron aliento para seguir adelante.

Durante estos últimos años logré encontrar muchos amigos que también contribuyeron durante todo este proceso de formación y en los cuales pasamos buenos y malos momentos que siempre recordaré, gracias por a Dios por ponerte esas buenas amistades en mi camino.

Jhon Luís Oquendo López

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean agradecer al Centro de Investigación para el Desarrollo e Innovación C.I.D.I, a la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Montería y al aporte de recursos del convenio 753 de 2013 “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe” BPIN N° 2012000100026 (Gobernación de Córdoba-UPB Montería).

Agradecemos a todas las personas de que de una u otra forma hicieron posible la realización de este trabajo, pero especialmente a nuestros directores Adrián Ávila y Jorge Mendoza por toda la disposición y colaboración que nos brindaron durante todo este tiempo, también a los ingenieros Rafael Gómez por toda la ayuda que nos brindó en esos momentos de dudas, Yahir González Y Jairo Durango por su colaboración y el tiempo que han dedicado para realizar un buen proyecto.

Por último agradecemos a la Universidad de Córdoba por darnos los conocimientos y herramientas que permitieron hacer de nosotros unos excelentes ingenieros Mecánicos.

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT	XVIII
OBJETIVOS.....	XX
INTRODUCCIÓN.....	1
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
1.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	7
1.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	9
1.2.1. ANOVA.....	9
1.2.2. Comparación de pares de medias de tratamientos.....	10
1.2.3. Prueba estadística para la igualdad de varianza.....	11
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
2.1. RECOLECCIÓN DE LA BIOMASA Y CARBÓN MINERAL.....	13
2.2. SECADO	13
2.3. TRITURACIÓN	14
2.4. CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS.....	15
2.5. PREPARACIÓN DE MEZCLAS	16
2.5.1. Mezclas con aglomerante.....	16
2.5.2. Mezclas sin aglomerantes.....	18
2.6. ENSAYOS	20

2.6.1. Análisis próximo.....	20
2.6.2. Análisis elemental.....	21
2.6.3. Poder Calorífico Superior	21
2.7. DENSIDADES	21
2.7.1. Densidad a granel.....	22
2.7.2. Densidad aparente (Post-fabricación de pellets) y reducción volumétrica	23
2.7.3. Densidad energética	24
2.8. DURABILIDAD MECÁNICA.....	24
2.9. ANÁLISIS ENERGÉTICO.....	25
2.9.1. Optimización de mezclas.....	25
2.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	26
3.RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	27
3.1. MATERIALES A GRANEL (PRE-FABRICACIÓN DE PELLETS).....	27
3.1.1. Secado.....	27
3.1.2. Trituración.....	28
3.1.3. Clasificación de partículas.....	30
3.1.4. Análisis físico - químico	31
3.1.5. Densidad a granel.....	35
3.2. MATERIALES COMPACTADOS (POST-FABRICACIÓN DE PELLETS)	37
3.2.1. Densidad aparente y reducción volumétrica	37

3.2.2. Poder calorífico y densidad energética.....	40
3.2.3. Durabilidad mecánica.	44
3.3. ANÁLISIS ENERGÉTICO.....	50
3.3.1. Optimización de las mezclas.....	57
4. CONCLUSIONES.....	60
5. BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS	69

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Estadística para la densidad a granel.....	69
Anexo 2. Estadística para la densidad aparente.....	70
Anexo 3. Estadística para el poder calorífico	71
Anexo 4. Estadística para el índice de durabilidad mecánica coco y aglomerante..	72
Anexo 5. Estadística para el índice de durabilidad mecánica algodón y aglomerante	73
Anexo 6. Estadística para el índice de durabilidad mecánica carbón y biomasa....	74

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Configuración de variables diseño combinado.....	16
Tabla 2. Arreglo experimental para el modelo de mezclas y factores categóricos combinados	17
Tabla 3. Configuración de variables diseño de mezclas	19
Tabla 4. Arreglo experimental para un modelo de mezclas.....	19
Tabla 5. Criterios de optimización.	26
Tabla 6. Clasificación granulométrica de Carbón y biomasa	30
Tabla 7. Análisis próximo y elemental de biomasa y carbón	33
Tabla 8. Análisis próximo y elemental de la literatura.....	35
Tabla 9. Densidad a granel de los materiales	35
Tabla 10. PDI pellets de biomasa con aglomerantes.....	45
Tabla 11. PDI pellets de biomasa y carbón sin aglomerante	47
Tabla 12. Resultados de la optimización.	57

LISTADO DE GRAFICOS

	Pág.
Grafico 1. Pérdida de humedad muestra de coco y algodón	28
Grafico 2. Clasificación granulométrica de la materia prima.	30
Grafico 3. Densidad a granel de las mezclas.....	36
Grafico 4. Densidad aparente pellets hechos con biomasa y carbón	38
Grafico 5. Resultados reducción volumétrica de pellets hechos con biomasa y carbón.....	39
Grafico 6. Poder calorífico ideal y experimental.....	41
Grafico 7. Resultados densidad energética.	42
Grafico 8. Superficie respuesta densidad energética	43
Gráfico 9. influencia del poder calorífico en la densidad energética.....	44
Grafico 10. PDI pellets de biomasa con aglomerante	46
Grafico 11. Superficie respuesta PDI (%).....	48
Gráfico 12. influencia del porcentaje de carbón en el PDI.....	49
Grafico 13. Superficie respuesta Poder calorífico superior	51
Gráfico 14. influencia del porcentaje de carbón en PCS.....	51
Grafico 15. Influencia del porcentaje de cenizas en el PCS	52
Grafico 16. Superficie respuesta Carbono fijo	53

Gráfico 17. influencia del porcentaje de carbón en el Carbono fijo.....	53
Grafico 18. Superficie respuesta Cenizas.....	54
Gráfico 19. influencia del porcentaje de coco en el contenido de cenizas.....	55
Grafico 20. Superficie respuesta Azufre total.....	56
Gráfico 21. influencia del porcentaje de carbón en el contenido de azufre.....	56
Grafico 22. Superficie respuesta resultados de optimización	58
Grafico 23. Superficie respuesta resultados de optimización (continuación).....	59

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Espacio de los factores restringidos para mezclas con 2 y 3 componentes.	9
Figura 2. Región experimental restringida para una mezcla con 3 componentes. ...	9
Figura 3. Metodología.....	12
Figura 4. Residuos de coco (A), algodón (B), aglomerantes(C)	13
Figura 5. Túnel de secado (A), disposición de la biomasa (B).....	14
Figura 6. Trituradoras para Carbón (A), Biomasa (B).	15
Figura 7. Tamices (A), tamizadora (B) y balanza (C).....	15
Figura 8. Residuos de coco (A), algodón (B), aglomerantes(C)	18
Figura 9. Pelletizadora (A), Matriz y rodillo (B).....	18
Figura 10. Residuos de coco (A), Algodón (B), Carbón mineral(C), mezcla (D), Pellets (E)	20
Figura 11. Procedimiento ensayo densidad a granel muestra M6.....	22
Figura 12. Pellets (A), caja rectangular (B), friabilômetro (C).....	24
Figura 13. Trituración residuos de coco	29
Figura 14. Trituración del Carbón mineral	29
Figura 15. Trituración residuos de algodón	29

RESUMEN

En el departamento de Córdoba-Colombia, la economía se basa principalmente en actividades agroindustriales que generan gran cantidad de biomasa, actualmente existen pocas investigaciones en la región que promuevan el aprovechamiento de estos residuos como fuente de energía. Además de los recursos agroindustriales también existen yacimientos de carbón mineral en Puerto Libertador al sur del departamento con una reserva estimada en 381 Millones de toneladas (UPME, 2005).

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el rendimiento energético de combustibles sólidos densificados, elaborados a partir de biomasa residual agroindustrial y carbón mineral del departamento de Córdoba. La biomasa fue caracterizada con relación al contenido de humedad, cenizas, carbono fijo, material volátil y poder calorífico superior con 3 repeticiones para cada ensayo. Fueron elaborados 6 tipos de pellets utilizando residuos de coco y algodón mezclados con 3 tipos de aglomerantes (maíz, yuca y plátano) y 9 tipos de pellets elaborados con residuos de coco, algodón y carbón mineral, se evaluó el índice de durabilidad para todos los tratamientos y las proporciones de biomasa-carbón, que brindaron el mayor potencial energético como biocombustible sólido (pellets). En el análisis físico químico se encontró que los residuos de coco y algodón tuvieron alrededor de un 0,96 y 1,95% más contenido de ceniza, 1,43 y 1,35%

menos contenido azufre y aproximadamente entre 7.14 y 6.12 MJ/Kg menos poder calorífico que el carbón mineral respectivamente. Los resultados evidenciaron que los residuos de coco y algodón estudiados presentaron poder calorífico entre 16,77 y 17,79 MJ/Kg, contenido de cenizas entre 4,93 y 5,92%, y otras características como contenido de azufre entre 0,12 y 0,2% respectivamente que los hacen buenos combustibles, por otra parte los pellets elaborados a base de biomasas-carbón presentaron índice de durabilidad superiores al 90%.

Palabras Clave: aglomerante, poder calorífico, pellets, durabilidad.

ABSTRACT

On the state of Córdoba-Colombia, the economy is mainly based on agro-industrial activities that generate large amount of biomass, currently there is little research in the region to promote the use of this waste as an energy source. Additionally to the agro-industrial resources, there are also deposits of coal in Puerto Libertador south of the state with an estimated reserve of 381 millions of tons.

The objective of this work was to evaluate the energy efficiency of densified solid fuels, made from farm industry biomass and coal from the department of Cordoba. The biomass was characterized in relation to moisture content, ash, fixed carbon, volatile matter and gross calorific value, with 3 replications for each test. For the first test, it was prepared 6 types of pellets using waste coconut and cotton mixed with 3 types of binders (corn, cassava and banana). For the second test, it was prepared 9 types of pellets made from waste coconut, cotton and coal, without using binder. The durability index was evaluate for all treatments. In the physical chemical analysis it was found that coconut and cotton residues showed 0.96 and 1.95% more ash content than coal. Also, they presented 1.43 and 1.35% less sulfur content and approximately between 7.14 y 6.12 MJ/Kg less higher calorific value than the coal. The results for coconut and cotton waste showed gross calorific value 16.77 and 17.79 MJ/Kg and ash content 4.93 and 5.92%

respectively. Other characteristics such as sulfur content coconut 0,12% and cotton 0,2% is considered low value (or good for quality). Pellets prepared from biomass-coal showed durability index higher than 90%.

Keywords: binder, calorific value, pellets, durability

OBJETIVOS

➤ **Objetivo general**

Evaluar el rendimiento energético de combustibles sólidos densificados, elaborados a partir de biomasa residual agroindustrial y carbón mineral del departamento de Córdoba.

➤ **Objetivos específicos.**

- Caracterizar las materias primas a utilizar a través de estudios físico-químicos y mecánicos, determinando el poder calorífico superior, Humedad Residual, generación de cenizas, Material Volátil, Carbono Fijo, %C, %H, %N, %O, %S, granulometría, densidad a granel, densidad aparente, durabilidad mecánica, utilizando análisis normalizados.
- Determinar las proporciones de aglomerante y biomasa que brinden el mejor comportamiento en términos de durabilidad.
- Determinar las proporciones de biomasa y carbón, que brinden el mayor potencial energético como biocombustible sólido (pellets), evaluando las respuestas del poder calorífico, carbono fijo, contenido de cenizas y azufre de cada una de éstas.

INTRODUCCIÓN

El aumento de los precios y los impactos causados al medio ambiente por el uso excesivo de combustibles fósiles motivó la investigación, desarrollo e implementación de nuevas fuentes de energía renovables, más baratas y menos contaminantes. (Spiro y Stigliani, 2009). La creciente demanda de energía aumenta la necesidad de ampliar la matriz energética, en la actualidad el uso de la biomasa como fuente de energía ha demostrado ser una alternativa interesante, por ser un recurso renovable, de bajo costo y amigable con el medio ambiente. Según Bapat et al. (1997) por detrás del carbón y el petróleo, la biomasa se considera como la tercera fuente de energía más grande del mundo.

En el departamento de Córdoba la economía se basa principalmente en actividades ganaderas y agrícolas, según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Córdoba para el año de 2014 registró una producción de 68596 toneladas de algodón DANE (2014) y de 13071 toneladas de coco para el año de 2010 (Mincomercio 2010). Aunque que no se cuenta con datos específicos que permitan calcular la producción de residuos durante las cosechas de estos cultivos, la Unidad de Planeación Minero Energético (UPME) los clasifica como cultivos de interés energético. Actualmente existen pocas investigaciones en la región que fomenten el uso de esos

recursos como fuente de energía. Por otra parte el departamento de Córdoba también cuenta con yacimientos carboníferos, como los de Puerto Libertador con una reserva estimada en 381 Mt. (UPME, 2005).

La biomasa tiene baja densidad y alta humedad en comparación con otros combustibles, por tanto, su aplicación como fuente de energía sin ningún tratamiento previo no es favorable. El contenido de humedad se puede disminuir con tratamientos convencionales y su densidad se puede aumentar, mediante ventaja mecánica generando materiales más densos conocidos como pellets y briquetas (Yaman et al. 2001). En América el mercado de producción de pellets actualmente está encabezado por Canadá que registró una producción de 1.4 y 3.6 de millones de toneladas para finales de 2010 y 2013 respectivamente, y en Argentina se cuenta con una capacidad de 50000 toneladas anuales. (Jiménez, 2014)

En este contexto este proyecto tiene como objetivo principal medir el rendimiento o la cantidad de energía por unidad de masa que son capaz de generar este tipo de biocombustible (pellets), los cuales son fabricados a partir de la mezcla de residuos agrícolas (desechos de algodón y coco) y carbón mineral, para de esta forma ofrecer alternativas viables para el óptimo aprovechamiento de los residuos agroindustriales y carbón mineral del departamento de Córdoba.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

El término biomasa se refiere a toda la materia orgánica que proviene de árboles, plantas y desechos de animales que pueden ser convertidos en energía. Esta es la fuente de energía renovable más antigua conocida por el ser humano, pues ha sido usada desde que nuestros ancestros descubrieron el secreto del fuego (BUN-CA 2002).

La variedad de materia orgánica posee a la vez una gran variedad de características físico-químicas, que son importantes al momento de elegir la biomasa adecuada para una aplicación específica. El contenido de humedad, la composición química y el poder calorífico de la biomasa son las propiedades físicas y químicas más importantes de los biocombustibles. En la literatura se encuentran normas estandarizadas para estudiar estas propiedades, la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales ASTM por sus siglas en inglés presenta normas estándares para caracterizar carbón y coque, estas son utilizadas por diversas investigaciones en la caracterización de biomasa. La composición inmediata proporciona las fracciones en peso, de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo de la muestra estudiada, por otra parte en la composición elemental son obtenidas las fracciones en peso de los elementos constituyentes de la biomasa.

Durante varias décadas, en algunos países de Europa y América del Norte, la densificación se ha utilizado ampliamente, este proceso consiste en compactar la biomasa mecánicamente, generando un calentamiento, que a su vez provoca la

disolución de la lignina presente, actuando como aglomerante durante el proceso. (Albuquerque 1997). Los combustibles densificados se pueden clasificar según su forma, los más comunes son pellets y briquetas. Autores como Kaliyan y Morey (2009) encontraron que el tamaño de partícula, el contenido de humedad en la materia prima y el precalentamiento durante la densificación afecta la densidad y durabilidad de los pellets. Estos mismos autores definen la prueba de durabilidad o resistencia a la abrasión como el ensayo que simula la manipulación de los productos densificados. Esta prueba puede ayudar a mejorar el proceso de densificación y por lo tanto el proceso de fabricación de los pellets. También existen normas estandarizadas para calcular el índice de durabilidad (PDI), o simplemente porcentaje de durabilidad, de acuerdo con Winowski (1998), el procedimiento más usado en la industria de los Estados Unidos se detalla en la norma estándar de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos o ASABE (2003).

En el departamento de Córdoba existen diferentes vocaciones productivas, entre las que se destacan la producción agrícola, la ganadería y porcicultura. Las actividades económicas dependen de las regiones, se estima que la superficie destinada a la agricultura según las estadísticas del Departamento Administrativo Nacional de Estadística DANE (2012) está alrededor de las 124.395 hectáreas lo que representa una participación nacional del 4.2%, dedicadas a cultivos transitorios, barbechos, y permanentes. Se destacan cultivos tales como el maíz, algodón, arroz, ñame, yuca, plátano, coco, sorgo, ajonjolí, entre otros.

Según el Informe de Coyuntura Económica Regional ICER (2012), El departamento de Córdoba continúa siendo el principal productor de algodón en el país. Durante 2012 participó con 51,9% del área cosechada y con 41.595 toneladas de algodón equivalentes

al 47,2% de la producción en Colombia; sin embargo, en esta última se registró una reducción de 11,3%. La producción de cocoteros del departamento según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural fue de 13.071 toneladas para el año 2010 participando con el 11.8 % de la producción nacional. (Mincomercio 2010).

De acuerdo con las resoluciones del Instituto Colombiano Agropecuario ICA, se recomienda la destrucción oportuna de las socas 10 días después de terminada la cosecha de algodón además aconseja no quemar los residuos para evitar la contaminación del aire (Corpoica y CVS 2009). Por otra parte la fibra proveniente de la cascara de coco, es reportada en la literatura como un producto de interés energético, en el país no se encontró una industria procesadora de este fruto que aproveche los residuos con fines energéticos, el coco se consume principalmente por su pulpa y agua natural. Esto evidencia un gran potencial para la producción de pellets y briquetas utilizando los residuos de coco y algodón que aún no se está aprovechando.

Colombia también cuenta con recursos de carbón de excelente calidad, suficientes para participar en el mercado mundial por mucho tiempo. Las reservas medidas son de 7.063,6 Mt (Millones de toneladas), ubicadas principalmente en la Costa Atlántica, donde se encuentra el 90% del carbón térmico que a su vez corresponde al 98% del carbón nacional. El 95% de las reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca. (UPME, 2005)

El área carbonífera de Córdoba corresponde a la zona de San Jorge, y el área ubicada entre los municipios Ciénaga de Oro y el corregimiento del Cerrito (Montería). En esta región sobresalen tres bloques carboníferos, Las Palmeras, la Escondía y la Guacamaya con reservas medidas de 381Mt. (UPME, 2005)

El uso de la biomasa como fuente de energía no es nuevo, en la literatura se encuentran investigaciones sobre combustibles sólidos densificados en forma de briquetas o pellets hechos a partir de biomasa, donde se resaltan autores como Rhén et al. (2007) que estudiaron pellets de fabricación industrial hechos a base de abeto rojo y pino silvestre. En la investigación incineraron pellets en un horno a escala de laboratorio variando la temperatura, el flujo de gas y la concentración de oxígeno, encontrando que el tiempo de combustión para un solo pellet dependía principalmente de la composición de materias primas y en un grado menor en la densidad. Los autores Mani et al. (2006a) elaboraron pellets de la paja de trigo, paja de cebada, tallos de maíz y pasto, estudiaron sus propiedades mecánicas variando la fuerza de compresión, tamaño de las partículas y el contenido de humedad concluyendo que los tallos de maíz producen la densidad de pellet más alta utilizando la menor fuerza de compresión. Este autor también estudió por separado la compactación de tallos de maíz. Los residuos se compactaron con un cilindro de pistón, bajo tres niveles de presión y tres niveles de contenido de humedad observó que la densidad aumentó con la presión y el contenido de humedad tuvo un efecto significativo sobre la densidad, durabilidad y estabilidad de briquetas. (Mani et al. 2006b).

Kaliyan y Morey (2009) Estudiaron los factores que afectan la durabilidad de combustibles densificados, cuestionaron los procedimientos utilizados para la medición de este parámetro y presentaron directrices sobre los niveles de aceptación del índice de fiabilidad en productos densificados. Un estudio similar lo llevaron a cabo Temmerman, et al. (2006) que compararon dos métodos para determinar la durabilidad en 26 tipos de pellets y 5 tipos briquetas, demostraron que la variabilidad de los resultados depende del propio biocombustibles. Entre las investigaciones hechas con desechos de plantas

agrícolas se destacan Holt, et al. (2006) que fabricaron pellets a partir de subproductos de algodonerías, determinaron sus propiedades físicas y midieron las emisiones cuando son quemados para calefacción residencial. Otro autor que estudió los residuos del algodón pero esta vez para el uso en briquetas fue Coates (2000) mostrando que los residuos de plantas procesadoras de algodón mezclados con cáscaras de nuez produjeron briquetas comercialmente aceptables, y además observó que las briquetas hechas con papel mostraron tiempo más largo de llama, y porcentaje de cenizas inferior, en comparación con las fabricadas de residuos de algodón.

La biomasa por lo general tiene estructura fibrosa que contiene componentes oleosos o pegajosos, que mejoran la densificación. Cuando se mezcla la biomasa con el carbón mineral estos componentes pueden comportarse como un aglomerante durante la fabricación de briquetas (Yaman 2001). En el departamento de Córdoba investigadores de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) fabricaron briquetas a base de carbón mineral y tusa de maíz. Observaron que el aumento del contenido de carbón en la briquetas representó un aumento del poder calorífico, pero a la vez un aumento en el porcentaje de azufre; mientras que el aumento del contenido de tusa en las briquetas bajó considerablemente los porcentajes de azufre sin afectar el poder calorífico significativamente (Nova et al. 2013)

1.1.DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En general, los experimentos se usan para estudiar el desempeño de un proceso. En ingeniería, un experimento puede definirse como una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios controladamente en las variables de entrada de un proceso para identificar los cambios en la respuesta de salida. Experimentos que involucran mezclas,

los factores son los componentes o ingredientes de la mezcla y, por consiguiente, sus niveles no son independientes. Es decir si x_1, x_2, \dots, x_p denotan las proporciones de p componentes de una mezcla, entonces según Cornell J. A (2002):

$$0 \leq x_i \leq 1 \quad i = 1, 2, \dots, p$$

$$x_1 + x_2 + \dots + x_p = 1 \quad (\text{es decir, } 100\%)$$

Según Thompson y Miers (1968) “En una mezcla de experiencia, se supone que las respuestas medidas sólo dependen de las proporciones relativas de los componentes y no de la cantidad de dicha mezcla”.

Cuando la mezcla está sujeta a esta condición, y dependiendo del número de componentes se pueden usar diseños estándares como el diseño Simplex – Lattice y Simplex – Centroide para estudiar la interacción de sus componentes, también pueden existir casos en los cuales existen restricciones adicionales, como un valor máximo y/o un mínimo para cada componente, entonces existen diseños fuera de lo habitual denominados diseños de mezcla limitada o Extreme – Vértices que se pueden aplicar.

La gráfica que muestra las respuestas en función de los componentes de una mezcla se denomina superficie respuesta. Para dos componentes, el espacio de los factores del diseño influye todos los valores de los dos componentes que están sobre el segmento de recta $X_1 + X_2 = 1$, con cada componente siendo acotado en 0 y 1, con tres componentes, el espacio de la mezcla es un triángulo donde los vértices que corresponden las mezclas puras (mezcla 100% de un solo componente) como se muestra en la figura 1.

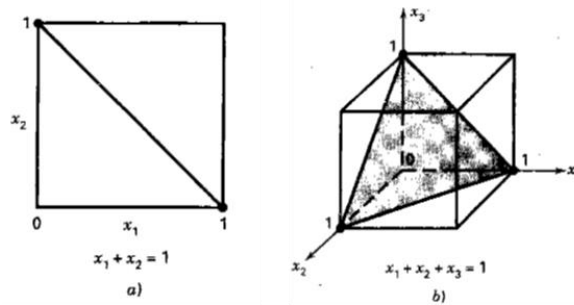


Figura 1. Espacio de los factores restringidos para mezclas con a) 2 y b) 3 componentes.
Fuente: (Vieira y Dal Bello. 2006).

La figura 2. Muestra con más detalle la región experimental restringida para una mezcla cuando hay tres factores. El lado opuesto a un vértice cualquiera representa el 0% de un componente, y Las líneas de graduación marcan el incremento del componente hasta el vértice o 100%.

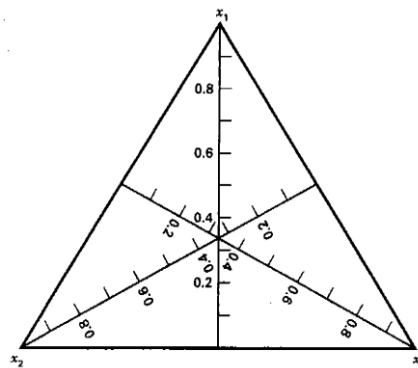


Figura 2. Región experimental restringida para una mezcla con 3 componentes.
Fuente: (Vieira y Dal Bello. 2006).

1.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

1.2.1. ANOVA

Cuando se desea comparar varias muestras, por lo regular se realiza un análisis de varianza (ANOVA). El interés se encuentra en probar la igualdad de las a medias de los tratamientos, la hipótesis adecuada es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots \mu_a$$

$$H_0: \mu_i \neq \mu_j \quad \text{para al menos } (i, j)$$

Por lo general μ se considera como una media global. El rechazo de la hipótesis nula indica que las muestras vienen de poblaciones cuyas medias no son todas idénticas.

El análisis de varianza descompone la variabilidad de los datos observados en dos componentes: un componente entre-grupos y un componente inter-grupal. Si la variabilidad estimada entre-grupos es significativamente más grande que la variabilidad estimada inter-grupal, es evidente que las medias de los grupos no son iguales.

Durante la interpretación de los resultados, cuando el Valor-P mostró un resultado más bajo que el nivel de confianza, se encontró que las muestras mostraron diferencias estadísticas significativas entre las medias. (Montgomery, 2008)

1.2.2. Comparación de pares de medias de tratamientos

En muchos casos después del análisis de varianza ANOVA se rechaza la hipótesis nula de la igualdad de medias de los tratamientos entonces se quiere comprobar todas comparaciones de medias de pares:

$$H_0: \mu_i = \mu_j$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j$$

Para toda $i \neq j$, Tukey propuso un método para probar hipótesis para las que el nivel de significancia es exactamente α cuando los tamaños de las muestras son iguales y es a lo sumo α cuando los tamaños de las muestras no son iguales.

Si el Valor-P en los resultados ANOVA es pequeño, entonces las medias muestrales deben ser examinadas para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de las otras. El Gráfico de Medias es usado para este propósito, éste muestra la media de

cada muestra, junto con un intervalo de incertidumbre a su alrededor. La interpretación de los intervalos depende del tipo de intervalo elegido, en este caso se eligió Intervalos HSD (Honesta Diferencia Significativa) de Tukey. Los intervalos se construyen con el fin de controlar la tasa de error del tratamiento en un 5% es decir con este método hay un riesgo del 5% al decir que uno o más pares son significativamente diferentes, cuando la diferencia real es igual a 0. (Tukey, J. W, 1949).

1.2.3. Prueba estadística para la igualdad de varianza

Para diagnosticar la desigualdad de la varianza es frecuente el uso de las gráficas residuales, existen varias pruebas estadísticas formales para probar la hipótesis:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots \sigma_a^2$$

$$H_1: \text{el enunciado anterior no es verdadero para al menos } \sigma_i^2$$

Un procedimiento muy utilizado es la prueba de Bartlett. Que incluye el cálculo de un estadístico cuya distribución de muestreo está aproximada muy de cerca por la distribución ji-cuadrada con a-1 grados de libertad cuando a muestras aleatorias son poblaciones normales independientes. Esta prueba nos indica si un valor-P es menor a 0.05 nos lleva al rechazo de la hipótesis de sigmas iguales al 5% del nivel de significancia. (Montgomery, 2008)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El diagrama de flujo simplificado de la figura 3 representa de manera general la secuencia metodológica utilizada para la producción y análisis de los pellets.

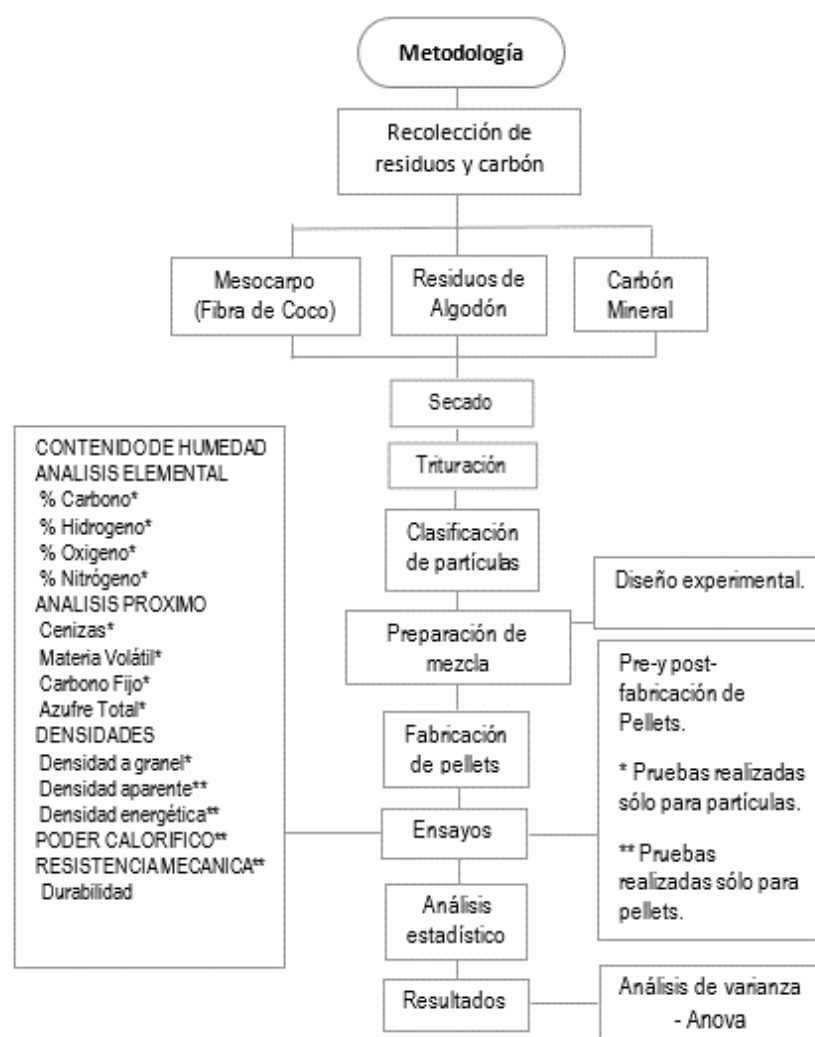


Figura 3. Metodología

2.1. RECOLECCIÓN DE LA BIOMASA Y CARBÓN MINERAL.

El proceso de fabricación de pellets comienza con la recolección de las materias primas en los distintos puntos de producción aledaños a la ciudad de Montería. Los residuos de coco fueron recolectados en las vías que comunican a Montería con Cereté en donde éste es comercializado en mayor medida por su agua natural. Los residuos de algodón fueron recolectados en las instalaciones de la Universidad de Córdoba y por último el carbón mineral fue suministrado por la mina “La Guacamaya” ubicada en Puerto Libertador-Córdoba. Las condiciones en las que se encontraba la biomasa y el carbón al momento de su recolección se pueden ver en la figura 4.

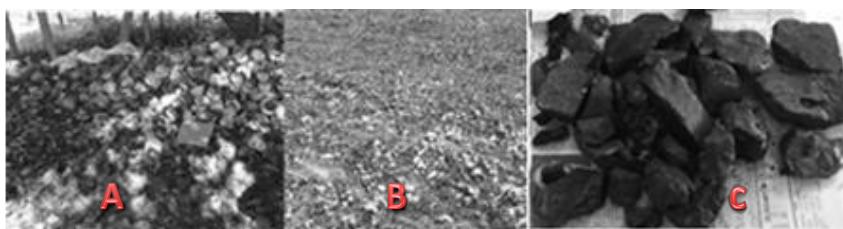


Figura 4. Residuos de coco (A), Residuos de algodón (B), Carbón mineral (C)

2.2. SECADO

La materia prima se trasladó al sitio de trabajo donde se realizó un secado al aire libre para evitar atascamiento en la etapa de trituración. Además, se seleccionó una muestra de biomasa para simular la pérdida de humedad con el tiempo. Este ensayo fue realizado utilizando el túnel de secado (figura 5 A) ubicado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) sede Montería.



Figura 5. Túnel de secado (A), disposición de la biomasa (B)

Tomada de: (Álvarez et al. 2010)

Se inició el secador y se entró a la interfaz SCADA donde se ajustaron los valores de temperatura y velocidad de aire, luego se pesaron 40 gramos de biomasa y se colocaron en la celda de carga del secador como se muestra en la figura 5 (B). Finalmente se puso en marcha el “blower” para dar inicio al procedimiento de secado y toma de resultados. La temperatura del túnel se programó a 45 °C y la velocidad del aire se ajustó a 3 y 2 m/s para los residuos de coco y algodón respectivamente.

2.3. TRITURACIÓN

La biomasa y el carbón mineral para poder ser densificados de una forma más eficiente es necesario primero reducir la materia prima a un tamaño de grano que fuera menor a 4mm. Para esta etapa se utilizaron dos trituradoras (figura 6); una para la molienda del carbón y otra para la biomasa de 5 y 3 hp de potencia respectivamente, ubicadas en la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB).

La trituración se realizó en dos pasos, primero se llevó a cabo una reducción de tamaño primaria por corte manual seguida de una reducción secundaria por impacto, utilizando las trituradoras industriales. Finalmente se almacenó la biomasa en sacos plásticos para evitar cambios en la humedad.

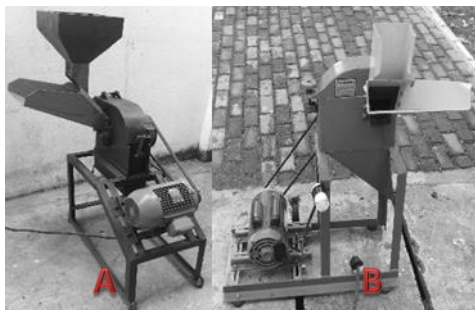


Figura 6. Trituradoras para Carbón (A), Biomasa (B)

2.4. CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS.

La clasificación de partículas fue realizada para conocer la distribución de tamaños que tenían la materia prima después de la trituración, se utilizó el método de tamices estandarizados que consiste en separar la muestra de material mediante tamices para luego calcular la fracción granulométrica que es el porcentaje de material que pasa por cada uno de estos y queda retenido en el siguiente.

Durante el proceso de tamizado de la biomasa y el carbón mineral se utilizaron tamices de distintos tamaños de malla, una tamizadora eléctrica y una balanza digital como se muestra en la figura 7. Ubicados en el laboratorio de la Facultad de ingeniería civil, Universidad Pontificia Bolivariana (UPB).

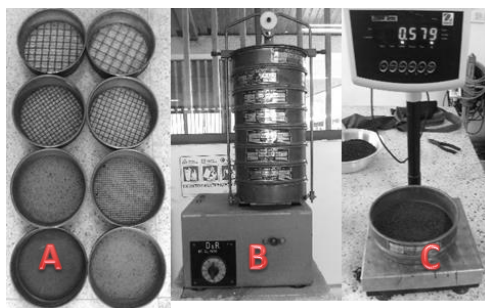


Figura 7. Tamices (A), tamizadora (B) y balanza (C).

El ensayo se realizó para 100 g de cada material seco, de acuerdo con la norma ASTM E11. Utilizando tamices de 20, 40, 60 y 100 mesh acoplados verticalmente uno encima

de otro, en orden de mayor a menor abertura y un fondo que recoge las partículas menores a 100 mesh. Para producir una buena separación del material, fue utilizada también la Maquina tamizadora marca D&R, RF SL-305S, la muestra se agitó por 15 minutos. Una vez realizada la agitación mecánica se procedió a pesar la masa retenida en cada tamiz utilizando una balanza digital. Finalmente se calculó la fracción granulométrica de cada uno de ellos según la ecuación (1). (ASTM, 2013b) así:

$$\%retenido = \frac{m_r}{m_t} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

m_r = masa retenida en cada tamiz , en gramos

m_t = masa total de la muestra, en gramos

2.5. PREPARACIÓN DE MEZCLAS Y FABRICACIÓN DE PELLETS

2.5.1. Mezclas con Aglomerantes

El arreglo experimental se realizó basado en un modelo de mezclas combinado con factores categóricos utilizando el programa Design Expert 9, en su versión de prueba.

Primero fueron configurados los rangos de las variables como se muestra en la tabla 1.

Los componentes de las mezclas fueron la biomasa y el aglomerante, el factor categórico el tipo de aglomerante utilizado en la mezcla (Yuca, Plátano o Maíz) y por último se seleccionó la respuesta del arreglo experimental como el índice de durabilidad.

Tabla 1. Configuración de variables diseño combinado

Componente	Nombre	Unidad	Tipo	Valor Mínimo	Valor Máximo
A	Biomasa	%	Mezcla	70	90
B	Aglomerante	%	Mezcla	10	30

Esta configuración anterior dio como resultado el arreglo experimental mostrado en la tabla 2. Donde el orden de corrida corresponde a la secuencia para realizar los experimentos y el orden estándar corresponde a la referencia para cada tipo de pellets.

Tabla 2. Arreglo experimental para el modelo de mezclas y factores categóricos combinados

orden estándar	Orden de Corrida	Biomasa %	Aglomerante %	Tipo de aglomerante
5	1	90	10	Maíz
3	2	90	10	Plátano
6	3	70	30	Maíz
1	4	90	10	Yuca
4	5	70	30	Plátano
2	6	70	30	Yuca

Este arreglo experimental fue elaborado para determinar la influencia del uso de aglomerantes en el proceso de pelletizado, teniendo en cuenta la evaluación de las respuestas obtenidas del diseño de mezclas.

Inicialmente se elaborarán pellet usando una proporción de 100% biomasa, 0% aglomerante tanto de algodón como de coco, con el fin de tener una referencia que permita establecer diferencias significativas o no en la respuesta de durabilidad que se estudiará. Luego siguiendo el orden de corrida de la tabla 2 se mezclaron los residuos de coco y los tipos de aglomerante (Yuca, Plátano o Maíz) según los porcentajes indicados en el arreglo experimental. Por otra parte y utilizando el mismo procedimiento se mezclaron los residuos de algodón con los tres tipos de aglomerante (figura 8).



Figura 8. Residuos de coco (A), algodón (B), aglomerantes(C)

Luego de preparadas las mezclas se procedió a fabricar los pellets, utilizando la pelletizadora tipo rodillo marca Gemco modelo ZLSP D- 200B y la matriz plana con perforaciones de 4 mm de diámetro mostrados en la figura 9, ubicados en Universidad Pontificia Bolivariana (UPB).

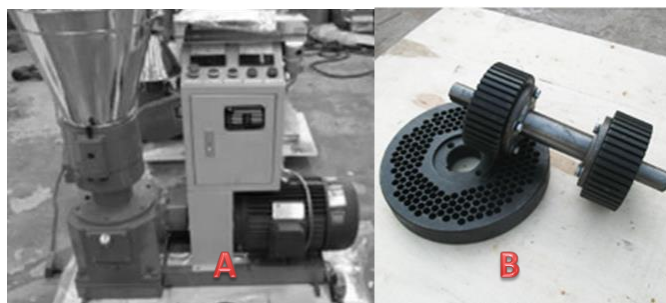


Figura 9. Pelletizadora (A), Matriz y rodillo (B)

Cada tratamiento fue mezclado manualmente y suministrados a las pelletizadora tipo rodillos por la tolva. La máquina cuya matriz se mantiene en movimiento presiona el material contra los rodillos logrando así la producción de los pellets. Finalmente cada tipo de pellets fue identificado por un código, secados al sol durante tres días y almacenados en sacos plásticos.

2.5.2. Mezclas sin aglomerantes.

Fue configurado otro arreglo experimental con el propósito de mezclar residuos de coco, algodón y carbón sin aglomerante, donde las variables fueron el porcentaje de los

componentes y la respuesta el poder calorífico superior, contenido de carbón fijo, cenizas, azufre y el índice de durabilidad. Como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Configuración de variables diseño de mezclas

Componente	Nombre	Unidad	Tipo	Valor Mínimo	Valor Máximo
A	Coco	%	mezcla	0	90
B	Algodón	%	mezcla	0	90
C	Carbón	%	mezcla	10	30

Esta configuración anterior dio como resultado el arreglo experimental mostrado en la tabla 4. Donde el orden de corrida corresponde a la secuencia para realizar los experimentos y el orden estándar corresponde a la referencia para cada tipo de pellets.

Tabla 4. Arreglo experimental para un modelo de mezclas

Orden estándar	Orden de corrida	Coco%	Algodón %	Carbón %
6	1	20	65	15
4	2	0	70	30
7	3	55	20	25
3	4	70	0	30
8	5	20	55	25
2	6	0	90	10
1	7	90	0	10
5	8	65	20	15
9	9	40	40	20

Siguiendo el orden de corrida se mezclaron los residuos de coco, algodón y el carbón mineral según los porcentajes indicados en el arreglo experimental como se muestra en la figura 10. Luego utilizando la maquina pelletizadora se fabricaron los 9 tipos de pellets sin la adición de aglomerante.

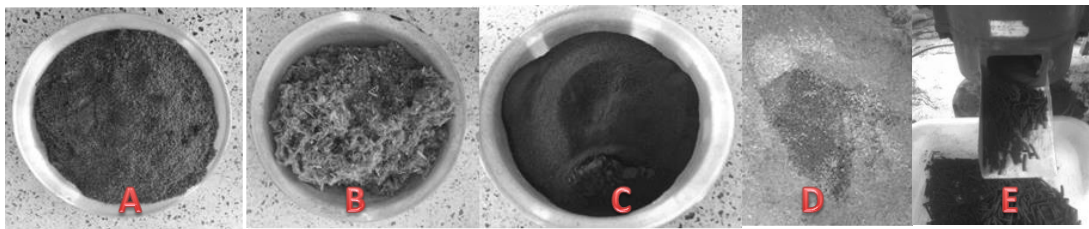


Figura 10. Residuos de coco (A), Algodón (B), Carbón mineral(C), mezcla (D), pellets (E)

2.6. ENSAYOS

Fueron seleccionados muestras de cada biomasa y carbón mineral para realizar análisis físico-químicos en el laboratorio de carbones de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Todos los ensayos fueron realizados con tres repeticiones.

2.6.1. Análisis próximo

Primero fue determinado el contenido de humedad por el método de mufla utilizando la norma D3173 (ASTM 2011a), En este método, las muestras fueron secadas en una mufla de laboratorio con circulación de aire a una temperatura entre 104 °C y 110 °C hasta que no tuviesen variación de peso. El tiempo de secado varió entre 12 y 48 horas para la biomasa y el carbón mineral respectivamente. El resto de los componentes fueron determinados en base seca, el contenido de volátiles fue determinado según la norma D3175 calentando las muestras contenidas en crisoles tapados, por siete minutos a 900 °C (ASTM 2011b)

El contenido de ceniza fue determinado elevando la temperatura de las muestras contenidas en crisoles sin tapa hasta 600 °C por seis horas según la norma D3174 (ASTM 2012).

El carbono fijo fue un valor calculado así: la resultante de 100 menos la suma del contenido cenizas, y la materia volátil.

2.6.2. Análisis elemental

Por otra parte se determinó el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre, y por diferencia a 100 del resto de los elementos, el contenido de oxígeno, según la norma (ASTM 2015).

2.6.3. Poder Calorífico Superior

El análisis de poder calorífico superior fue determinado utilizándose la técnica de bomba calorimétrica a volumen constante. Todas las muestras fueron clasificadas con granulometría de 60 mesh (250 μm) y quemadas en oxígeno puro a una presión de 3000 KPa siguiendo la norma D5865.

Se tomó 1.000 g de cada muestra y luego cada una fue introducida dentro de un recipiente de metal con atmósfera de oxígeno a presión. La bomba fue entonces sumergida en un recipiente con pared doble que contiene agua en su interior y la camisa. El calorímetro realiza la ignición de la muestra a través de una conexión eléctrica externa y calcula energía liberada en el proceso de combustión automáticamente después de aproximadamente 15 min. (ASTM, 2013c)

2.7. DENSIDADES

Las densidades fueron calculadas para el arreglo experimental de la tabla 4. (Sección 2.5.2) como sigue:

2.7.1. Densidad a granel

El análisis de la densidad a granel fue realizado con la adaptación de la norma CEN/TS 15103, utilizando un beaker de 1000 ml y una balanza digital. En la figura 11 se muestra el procedimiento para el tratamiento M6. Primero se verificó el peso del recipiente, posteriormente se llenó con la muestra, y se dejó caer desde 150 mm de altura sobre una base de madera (3 veces + relleno). Finalmente se determinó la masa de la muestra que llena el volumen como se muestra en la figura 11 y se calculó la densidad a granel según la ecuación (2) para dos muestras gemelas, expresando el resultado como el promedio aritmético de los dos ensayos (AENOR 2010).

$$\rho_g = \frac{B - A}{V} \quad (2)$$

Dónde:

ρ_g = densidad a granel, en g/cm³

A= masa del beaker, en gramos

B= masa del beaker con biomasa, en gramos.

V= volumen del beaker, en cm³



Figura 11. Procedimiento ensayo densidad a granel muestra M6

2.7.2. Densidad aparente (Post-fabricación de pellets) y reducción volumétrica

Para el cálculo de la densidad aparente, primero se midió utilizando un calibrador la altura y diámetro de 10 pellets por tratamiento seleccionados al azar, con los datos se calculó el volumen promedio considerando la forma cilíndrica de los pellets, según la ecuación (3).

$$V = \left[\frac{\pi * l * \phi^2}{4} \right] * 10^{-3} \quad (3)$$

Dónde:

V= Volumen de cada pellets, en cm^3 ;

ϕ = diámetro, en mm

L = altura, en mm

Finalmente se determinó la masa de cada pellets utilizando una balanza digital y se calculó la densidad relativa aparente según la ecuación (4) expresando el resultado como el promedio aritmético de 10 repeticiones.

$$\rho_a = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Dónde:

ρ_a = densidad aparente, en g/cm^3

m = masa de cada pellets, en gramos

V= volumen de cada pellets, en cm^3

La reducción volumétrica posibilitó verificar el porcentaje de reducción de volumen de los materiales después de la fabricación de los pellets. Se calculó comparando la densidad aparente de los pellets con la densidad a granel según la ecuación (5).

$$\% = \frac{\rho_a}{\rho_g} * 100 \quad (5)$$

Dónde:

ρ_a = densidad aparente, en g/cm³

ρ_g = densidad a granel, en g/cm³

2.7.3. Densidad energética

Para evaluar la densidad energética, se tuvo en cuenta la densidad relativa aparente, y el poder calorífico. Para las mezclas, se determinó el poder calorífico superior de cada tratamiento y se calculó de densidad energética según la ecuación (6).

$$\rho_e = \rho_a * PCS * 10^3 \quad (6)$$

Dónde:

ρ_e = densidad energética, en KJ/m³

ρ_a = densidad relativa aparente, en g/m³

PCS = poder calorífico superior, en KJ/Kg

2.8. DURABILIDAD MECÁNICA

El análisis de durabilidad mecánica se realizó con la adaptación de la norma estándar ASABE S2694. Utilizando el friabilómetro, el cual estaba equipado con una caja rectangular de dimensiones interiores 30,5 x 30,5 x 12,7cm y un motor controlado por PLC (Figura 12). Ubicados en Universidad Pontificia Bolivariana (UPB).

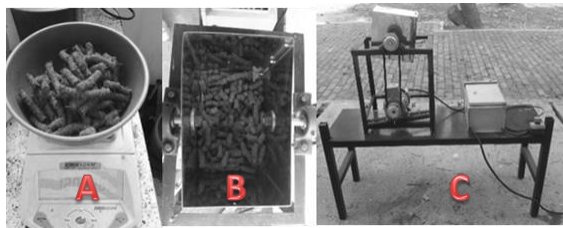


Figura 12. Pellets (A), caja rectangular (B), montaje prueba (C)

Se pesó una muestra de 250 g de pellets, esta se colocó dentro de la caja del equipo y se selló para evitar pérdidas, posteriormente se puso en marcha el motor durante 10 minutos a 50 rpm. Al terminar el ensayo se separó los finos generados utilizando un tamiz con abertura 0.8 veces el diámetros de los pellets (3,2 mm para este caso) y finalmente se calculó el índice de durabilidad utilizando la ecuación 7. El procedimiento se repitió para todos los tratamientos. (ASABE 2013)

$$PDI = \frac{m_f}{m_i} * 100 \quad (7)$$

Dónde:

m_i = masa inicial, en gramos

m_f = masa final (retenida en el tamiz), en gramos

PDI= Porcentaje de durabilidad

2.9. ANÁLISIS ENERGÉTICO.

Utilizando las mezclas compuestas por biomasa (coco y algodón) y carbón mineral, sin aglomerante de la tabla 4 (sección 2.5.2) se estudió el comportamiento de las características (PCS, contenido de carbono fijo, cenizas y azufre) utilizando diagramas de superficie respuesta (MSR).

2.9.1. Optimización de mezclas

Utilizando el software Design Expert en su versión de prueba se optimizaron las mezclas, con el fin de encontrar una o varias con máximo porcentaje de biomasa utilizada (coco y algodón), mínimo porcentaje de carbón y al mismo tiempo presentaran máximo PCS y contenido de carbono fijo, mínimo contenido de cenizas y azufre entre los límites inferior y superior presentados. Con el fin de obtener los mejores resultados ajustados a nuestra deseabilidad, se eligieron los valores de importancia más adecuados

para cada componente siendo el poder calorífico el más importante de las respuestas, como se ilustra en la Tabla 5.

Tabla 5. Criterios de optimización.

Variable	Objetivo	Limite Inferior	Limite Superior	Importancia
A: Fibra de coco	maximizar	0	90	2
B: Residuos de Algodón	maximizar	0	90	2
C: Carbón Mineral	minimizar	10	30	3
Respuesta				
PCS (MJ/Kg)	maximizar	17.3211	19.2664	4
Carbono fijo (%)	maximizar	19.733	30.6116	2
Cenizas (%)	minimizar	4.6438	5.7276	2
Azufre (%)	minimizar	0.263	0.605	2

2.10. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con la asistencia del programa Statgraphics versión 2.15.05, y Excel 2013.

El procedimiento comparó los datos obtenidos, mediante análisis de homogeneidad Bartlett, varianza ANOVA y Tukey. La prueba-F en la tabla ANOVA determinó si había diferencias significativas entre las medias. Si las había, se procedió con las Pruebas de Rangos Múltiples con el fin de analizar cuáles medias eran significativamente diferentes de las otras.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados se dividieron en dos etapas, la primera parte se relaciona con los resultados de los materiales en partículas (antes de la compactación) y la segunda parte se refiere a los resultados de los materiales densificados post-fabricación de pellets.

3.1. MATERIALES A GRANEL (PRE-FABRICACIÓN DE PELLETS)

3.1.1 Secado

Como se puede apreciar en el gráfico 1, bajo las condiciones programadas en el túnel de secado, se logró retirar más del 25% y aproximadamente 2% de la humedad contenida en la fibra de coco y residuos de algodón respectivamente, hasta alcanzar un punto de estabilización que se aprecia en el tramo final de la curva, donde la tendencia del gráfico se mostró constante en el tiempo.

Como era de esperar la cantidad de humedad contenida en los residuos de algodón fueron menores comparados con la fibra de coco, ya que la planta de algodón es secada al sol para luego recoger la fibra, consecuentemente los residuos de estas cosechas quedan prácticamente secos, en cambio los desechos de coco se encuentran acumulados a la intemperie. Por otra parte aunque la fibra de coco presentó más tiempo para alcanzar la humedad de equilibrio, tal como se muestra en el gráfico 1 (a) éste mostró una curva con menos perturbaciones. El ruido mostrados en el gráfico 1(b) de remoción de algodón

puede representar pérdida de material causados por el flujo de aire, lo que significa que al usar un secado al sol para gran cantidad de biomasa se necesitará más tiempo para secar residuos de coco, pero al mismo tiempo se presentarán pérdidas para los residuos de algodón por causa del flujo natural del aire en espacios libres.

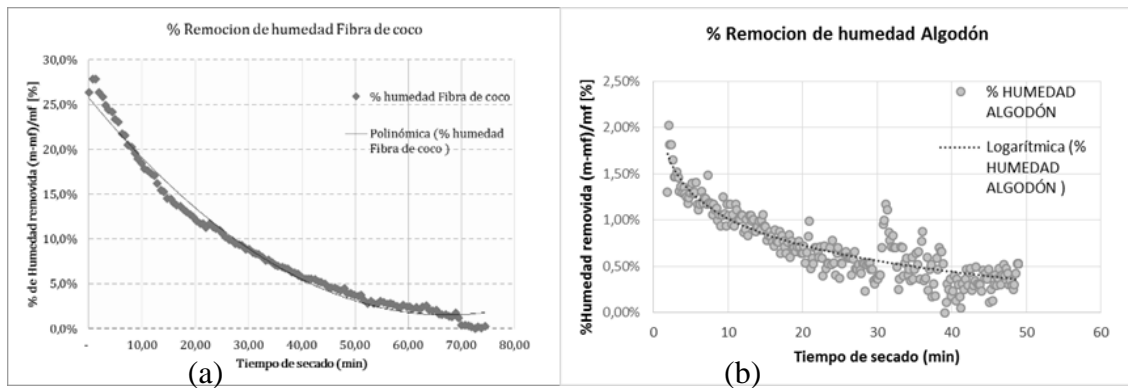


Gráfico 1. Pérdida de humedad muestra de (a) coco y (b) algodón

3.1.2. Trituración.

La cáscara de coco y carbón mineral, por encontrarse en su forma natural fue necesario realizar una pre-molienda para disminuir sus tamaños de grano, lo que aumentó los consumos energéticos, en las figuras 13 y 14 se puede observar de izquierda a derecha la reducción en el tamaño de las partículas. Después de realizar las etapas de trituración, también se encontró, que particularmente los residuos de coco presentaron dos tipos de granulometría por separado una con características de fibra y otra con característica granular, como ve en la figura 13, se puede inferir que la fibra se obtuvo de la parte media o capa central de la cascara llamada Mesocarpo y el resto de la cubierta o capa externa llamada Exocarpo, porque la capa central de la cascara está compuesta por pequeñas microfibrillas que la trituradora no alcanzó a triturar quedando retenidas en la malla de la maquina en cambio con la capa externa de la cascara ocurre lo contrario.

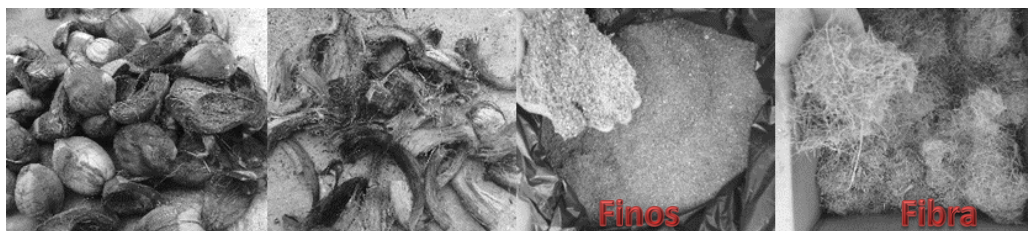


Figura 13. Trituración residuos de coco



Figura 14. Trituración del Carbón mineral

Los residuos de algodón como se encuentran in situ están compuestos de fibra algodón, la cacota que contiene el algodón y tallos de la planta, estos residuos se trituraron hasta obtener la granulometría que se muestra en las figuras 15. Se puede apreciar que para estos residuos, no fue necesario realizar una trituration primaria, ya que se la materia prima se encontró con un tamaño relativamente pequeño esto se debe porque durante la cosecha del algodón los residuos son cortados y apilados en hileras lo que facilita su recolección y consecuentemente disminuye consumos energéticos durante la preparación de la biomasa.



Figura 15. Trituración residuos de algodón

3.1.3. Clasificación de partículas

Después de la trituración se procede a clasificar las partículas para verificar el rango de tamaño o distribución en que se encuentran las partículas de carbón mineral, cáscara de coco, y residuos algodón. Los resultados se pueden observar en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación granulométrica de Carbón y biomasa

Numero de Tamiz	Abertura del tamiz (mm)	% Retenido		
		Carbón	algodón	Cascara de coco
# 20	0.850	67,40	75,82	14,52
# 40	0.600	16,51	5,08	22,31
# 60	0.425	6,93	6,89	27,28
#100	0.150	3,88	6,49	19,27
Fondo	-	5,28	6,46	16,73

Para una mayor interpretación de los resultados los datos de la tabla 6 se muestran en el grafico 2. Donde se puede observar que la mayor concentración de finos de carbón mineral y algodón quedaron retenidos en el tamiz número 20, lo que indica que las partículas de estas materias primas se encuentran aproximadamente entre 67% y 76% con tamaños de 0.85mm. Por otro lado la fibra de coco presentó una distribución de tamaño homogénea, con la mayor concentración retenida en el tamiz número 60

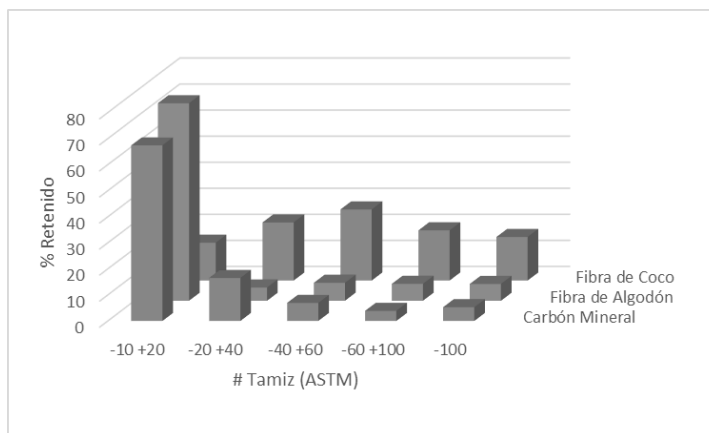


Gráfico 2. Clasificación granulométrica de la materia prima.

3.1.4. Análisis físico - químico

Los resultados del análisis próximo y último de la materia prima se resumen a continuación en la Tabla 7. Estos fueron suministrados por el laboratorio de carbones de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

El contenido de humedad en los materiales puede afectar en la formación de pellets puesto que puede aumentar o disminuir su resistencia, debido a que de esta depende la formación de ligaciones entre las moléculas de los materiales, pero también la falta o exceso de humedad en los materiales desfavorecen este proceso, por tanto el conocimiento de esta característica es importante para la adecuación de los materiales. Según Ortiz, Torres (2008) el contenido de humedad recomendado para pelletización no debe ser menor al 8% ni mayor 15%, por lo tanto se puede decir que los materiales después de secados al aire libre presentan un contenido de humedad en el rango adecuado. Según Tripathi, A et al. (1998) el contenido de humedad recomendado para fabricar briquetas varía entre 10% a 15%, por tanto estos valores pueden ser utilizados también para fabricar pellets.

Los resultados en el análisis próximo mostraron que el carbón mineral presentó lógicamente mejores propiedades energéticas que la biomasa, el contenido de cenizas fue aproximadamente de 3,69%. Las muestras de biomasa presentaron un contenido de cenizas más alto que el carbón, lo que significa un mayor contenido de residuos provocando una reducción en el poder calorífico del combustible. Según Tripathi, A et al. (1998) son preferidas biomásas con un porcentaje de ceniza menor al 4% para fabricación de briquetas. Contenido elevado de ceniza del combustible puede afectar el equipo de combustión por aumentar los procesos de limpieza.

Con relación al contenido de volátiles la biomasa de algodón presento el mayor contenido aproximadamente de 77,33% seguida por la fibra de coco y por último el carbón mineral tal como se puede observar en la tabla 7. Según Sánchez (2010), los volátiles están compuestos por vapores, gases y solo una pequeña porción de estos posee alto poder calorífico, por lo tanto puede considerarse que el contenido de volátiles no es determinante en las características de los combustibles, sin embargo alto contenido de volátiles indica que el combustible se quema rápidamente en la etapa de ignición es por eso que las biomásas poseen un contenido más alto que el carbón.

Contrario al contenido de material volátil, el carbono fijo si es una característica crucial en la composición de un combustible pues representa la mayor fuente de calor durante la combustión del combustible. Los resultados mostraron lógicamente que el carbón mineral presenta el más alto contenido en este compuesto, seguido por la fibra de coco y los residuos de algodón.

El análisis próximo de los materiales sin mixturar, permite inferir características químicas que podrían tener la mezclas y consecuentemente los pellets, una vez que las características químicas de los materiales puros (cenizas, volátiles y carbono fijo) normalmente no son alteradas durante el proceso de la compactación. Se busca obtener una mezcla con la que se puedan obtener pellets con bajo contenido de cenizas y alto contenido de material volátil.

Los principales elementos en el análisis elemental son el carbono y azufre, los resultados mostraron que el carbón mineral presentó 60,29% de carbono pero alto porcentaje de azufre 1,55%, evidenciado la problemática ambiental que presenta este combustible ya que sobrepasa en un 55% el límite superior permitido por la normatividad vigente para la calidad del carbón mineral, de acuerdo a la Resolución 623 de 1998, capítulo II,

artículo 1 del Ministerio del Medio Ambiente, dice que para la costa atlántica el contenido de azufre en peso para el carbón mineral o mezclas con éste, no debe exceder el 1%. Por el contrario las biomásas presentaron contenidos de azufre casi despreciables y más de la mitad del porcentaje de carbono presentado por el carbón mineral.

Comparando el poder calorífico de los materiales analizados se observó que los residuos presentaron una diferencia de 1,02 MJ/Kg la cual no fue significativa, para el carbón mineral se presentó un poder calorífico de 23,91 MJ/Kg, resultado mayor en 6,12 y 7,14 MJ/Kg que los residuos de algodón y coco respectivamente. El carbón presentó ventaja en cuanto al poder calorífico, por lo que este material ha sido utilizado como combustible por siglos para impulsar diferentes tipos de máquinas y aunque también mostró un menor contenido de cenizas de 3,69% comparado con el 4,93% y 5,92% del coco y algodón respectivamente, el alto contenido de porcentaje azufre expone sus problemas ambientales.

Tabla 7. Análisis próximo y elemental de biomásas y carbón

Análisis	Tipo de materia prima		
	Fibra de coco	Residuos de algodón	Carbón mineral
Humedad (%m)	13.12	10,78	11.52
Volátiles (%m)	71,324	77,332	49,397
Cenizas (%m)	4,933	5,923	3,969
Carbón fijo (%m)	23,741	16,743	46,643
Poder calorífico (MJ/Kg)	16,77	17,79	23,91
%C	39.40	39.30	60.29
%H	4.27	4.70	4.61
%N	0.70	1.21	1.47
%S	0.12	0.2	1.55
%O	50.41	49.15	28.12

Yin (2011) presentó dos nuevos tipos de correlación empírica para predecir el poder calorífico superior de materiales lignocelulósicos, basándose en el análisis último y próximo de los mismos. En la tabla 8 se muestran 2 de las 44 tipos de biomasa que el autor utilizó. Los datos de los residuos de coco y algodón están en base seca, se puede observar que el coco estudiado por el autor tenía un contenido de cenizas más bajo que el presentado por este estudio, caso contrario al contenido de cenizas del algodón, los resultados pueden variar de acuerdo a como los residuos fueron recolectados y tratados.

El contenido de cenizas, o el contenido de minerales que presentaron los materiales, puede causar desgaste en los equipos de densificación cuando estos trabajan a velocidades altas, es decir cuanto mayor sea el contenido de cenizas mayor es la posibilidad de desgaste en pelletizadoras o briqueteadoras, lógicamente para el carbón mineral esta propiedad es relativamente alta, Pineda et al. (2011) Caracterizó el carbón mineral proveniente de Puerto Libertador- Córdoba y sus muestras presentaron un poder calorífico de 24,03 MJ/Kg y un porcentaje de cenizas de 5,50%, el porcentaje de azufre fue mucho más alto, aproximadamente de 2,34% de azufre total correspondiente a 1.34% pirítico, 0.90% orgánico y 0.10% de sulfatos este autor clasificó el carbón como tipo bituminoso clase C.

Tabla 8. Análisis próximo y elemental de la literatura

Análisis	Tipo de materia prima		
	Fibra de coco	Residuos de algodón	Carbón mineral
Referencia	(Yin 2011)	(Yin 2011)	(Pineda et al. 2011)
Humedad (%m)	-	-	14.20
Volátiles (%m)	77.19	72.80	40.20
Cenizas (%m)	0.71	6.61	5.50
Carbón fijo (%m)	22.10	20.59	40.10
Poder calorífico (MJ/Kg)	20.50	16.90	24.03
%C	50.22	47.03	-
%H	5.70	5.96	-
%S	-	0.19	2.34
%O	-	38.42	-

3.1.5. Densidad a granel

En la tabla 9 se muestran los resultados correspondientes al ensayo de densidad a granel, el carbón presentó el valor más alto, seguido por los residuos de coco y algodón, esto quiere decir que el algodón posee más espacios entre sus partículas. Este parámetro puede ayudar a calcular el espacio donde la biomasa después de triturada se puede almacenar para ser utilizada en posteriores procesos, y también sirve para evaluar la eficiencia de compactación durante la pelletización.

Densidades típicas de residuos agrícolas recolectados por diversos métodos van desde 0,16 a 0,35 g/cm³, Estos son mucho menos densos que los residuos de madera, que son aproximadamente 0,638 g/cm³ dependiendo el tipo de madera (Wayne Coates 2001).

Tabla 9. Densidad a granel de los materiales

Material	Densidad g/cm ³
Fibra de coco	0,2204
Residuos de algodón	0,1552
Carbón mineral	0,7718

El gráfico 3 muestra la densidad a granel para los 9 tratamientos del arreglo experimental donde se mezcló residuos de coco y algodón con carbón mineral. La composición de cada una de estas mezclas se puede ver en la tabla 4 de la sección 2.5.2, dónde la designación de M1 hasta M9 corresponde al orden estándar mostrado en ésta. Los resultados de la densidad que se obtuvieron con los materiales puros se distribuyeron matemáticamente dependiendo del porcentaje correspondiente en cada tratamiento, la línea superior representa estos resultados ideales y las barras representan los resultados experimentales. Los tratamientos fueron organizados de menor a mayor contenido de carbón para facilitar su interpretación, el gráfico muestra una tendencia ascendente muy parecida a la ideal, a mayor contenido de carbón mayor densidad a granel, este resultado era esperado ya que el carbón por si solo tiene la mayor densidad a granel y se supone que las características de las mezclas dependen del porcentaje de sus componentes y no de la cantidad total.

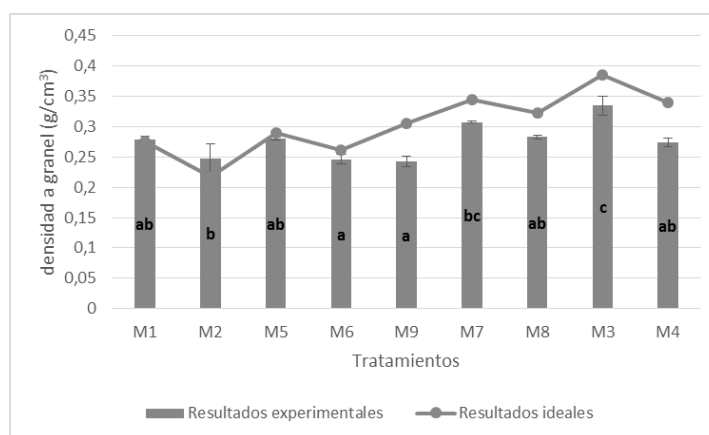


Gráfico 3. Densidad a granel de las mezclas

El análisis estadístico se muestra en anexo 1, en la prueba de varianza ANOVA se encontró que el valor-P de la prueba-F fue de 0,0002, menor que 0,05 por lo tanto existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 9 tratamientos con

un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medias fueron significativamente diferentes de otras se utilizó el procedimiento de comparación múltiple que emplea la diferencia honestamente significativa (HSD) de Tukey para discriminar entre media, la densidad a granel de los 9 tratamientos presentaron 3 grupos homogéneos clasificados como a b y c, el gráfico 3, muestra cada tratamiento y su respectivo grupo, no existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos tratamientos que compartan la misma clasificación. Por otra parte se evaluó la hipótesis nula de las desviaciones estándar dentro de cada una de los 9 tratamientos utilizando el método de Bartlett, los resultados mostraron que el valor-P fue de 0,548316 mayor o que 0,05, por lo tanto no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza, invalidando las pruebas estadísticas aplicadas.

3.2. MATERIALES COMPACTADOS (POST-FABRICACIÓN DE PELLETS)

3.2.1. Densidad aparente y reducción volumétrica

El gráfico 4 muestra la densidad aparente promedio que se calculó para los 9 tipos de pellets hechos con biomasa y carbón mineral, en este caso no se muestra la densidad aparente ideal ya que no se hicieron pellets de carbón mineral puro sin embargo se puede apreciar la tendencia ascendente de los resultados. A medida que aumentó el porcentaje de carbón en los pellets, se presentó mayor densidad aparente, el cual es factor importante debido a que significa mayor energía acumulada por unidad de volumen. Los mayores valores de densidades aparentes fueron encontrados en los tratamientos compuestos por 70% biomasa y 30% carbón, M3 y M4 presentaron densidades de 1,12 y

1,16 g/cm³ respectivamente mientras que las menores densidades fueron presentadas por los tratamientos compuestos por 90% biomasa y 10% carbón.

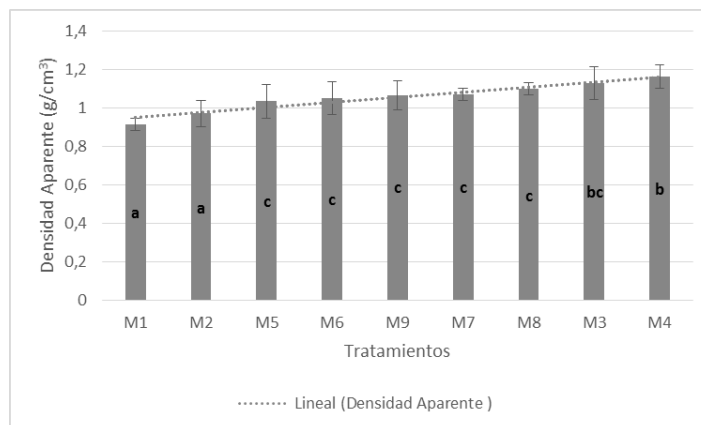


Gráfico 4. Densidad aparente pellets hechos con biomasa y carbón

Según Torres (2008) los pellets tienen una densidad entre 1,0 a 1,2 g/cm³ dependiendo del material que los compone, solo se encontraron dos tratamientos con densidad aparente inferior a 1,0 g/cm³, estos fueron M1 y M2 con 0,915 y 0,971 g/cm³ respectivamente.

El análisis estadístico se muestra en anexo 2, en la prueba de varianza ANOVA se encontró que el valor-P de la prueba-F fue de 0,00001 menor que 0,05 por lo tanto existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 9 tratamientos con un nivel del 95,0% de confianza. Seguidamente la discriminación entre medias utilizando el método de Tukey identificó 3 grupos homogéneos, la clasificación se puede ver en el gráfico 4, no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos homogéneos y por último puesto que el valor-P fue de 0,06964 en la prueba estadística de Bartlett entonces no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza evidenciando que

los datos son confiables. Los análisis estadísticos muestran que el porcentaje de carbón en las mezclas tiene mayor influencia en la densidad energética.

En los procesos de compactación, uno de los dos principales parámetros a ser investigado es la reducción volumétrica, pues, generalmente los materiales cuando no son compactados poseen baja densidad dificultando el almacenamiento y transporte. Con los datos de densidad a granel y densidad aparente de cada tratamiento se calculó la reducción volumétrica. El gráfico 5 muestra los resultados.

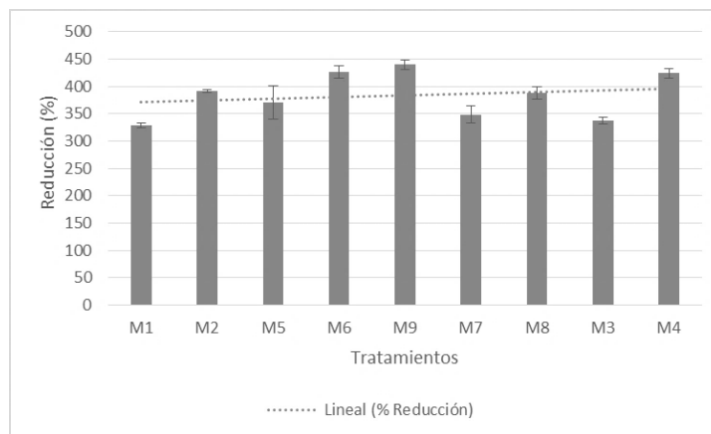


Gráfico 5. Resultados reducción volumétrica de pellets hechos con biomasa y carbón

La reducción volumétrica mostró el porcentaje de reducción de volumen inicial de las mezclas en la formación de los pellets, por tanto se confirmó que la reducción en todos los pellets superó el 328% en comparación con el volumen inicial de las mezclas, alcanzando valores máximos de 429% de reducción, esto es una muestra de las ventajas que ofrece el proceso de densificación en este caso la pelletización, el cual en base a los resultados obtenidos es claro que ofrece la posibilidad de almacenar tres o cuatro veces más una misma cantidad de masa en un mismo volumen inicial.

La línea punteada representa la tendencia creciente de los resultados conforme aumentó el contenido de carbón en los tratamientos, la no linealidad de los resultados puede ser explicada por errores experimentales, tales como la calidad en la fabricación de los pellets, porcentaje de humedad al momento de tomar los datos.

3.2.2. Poder calorífico y densidad energética

El poder calorífico en la mezclas fue calculado a partir del valor encontrado en los materiales puros, la línea superior en el grafico 6 representa la tendencia ideal del poder calorífico conforme aumentó el porcentaje de carbón en las mezclas, las barras representan los resultados experimentales de poder calorífico.

Es evidente el aumento en el poder calorífico conforme aumentó el porcentaje de carbón en los tratamientos, M1 con una composición de 90% fibra de coco y 10 % de carbón mineral fue el tratamiento que presentó el menor poder calorífico resultado que se muestra en el gráfico 6, el aumento del poder calorífico conforme aumentó el contenido de carbón en los tratamientos se debió porque este material presentó el poder calorífico más alto entre los componentes de las mezclas. M4 con una composición de 70% de coco y 30% de carbón fue el tratamiento con mayor poder calorífico, este resultado es mayor que el poder calórico del coco y el algodón puros, es decir la adición de carbón mineral mejoró esta característica

En el anexo 3 se muestra los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a los datos de poder calorífico superior. El análisis estadístico ANOVA mostró que el valor-P de la razón-F fue de 0,0001 menor que 0,05 por lo tanto existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los 9 tratamientos con un nivel del 95,0% de confianza. Seguidamente la discriminación entre medias utilizando el método de Tukey identificó 5

grupos homogéneos, no existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos homogéneos y por último puesto que el valor-P fue de 0,99793 en la prueba estadística de Bartlett entonces no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza evidenciando que los datos son confiables.

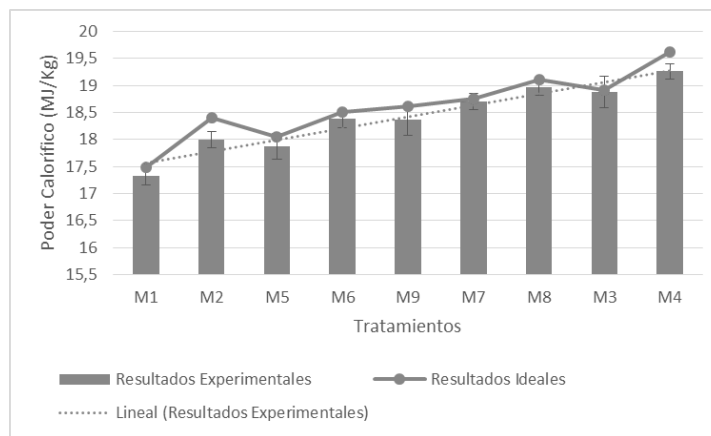


Gráfico 6. Poder calorífico ideal y experimental.

Los parámetros de poder calorífico y densidad energética son vistos como importantes indicativos al momento de escoger un material como combustible, los pellets con mayor contenido de carbón probaron tener mayor poder calórico. El gráfico 7 muestra la tendencia, en los resultados de densidad energética, a mayor contenido de carbón en los tratamientos mayor contenido de energía por unidad de volumen este hecho se debió principalmente porque los pellets elaborados con alto contenido de carbón mineral presentaron alta densidad aparente resultado que influenció la densidad energética.

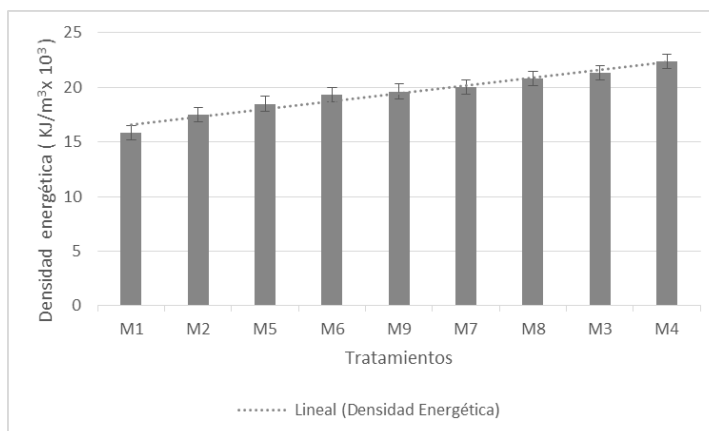
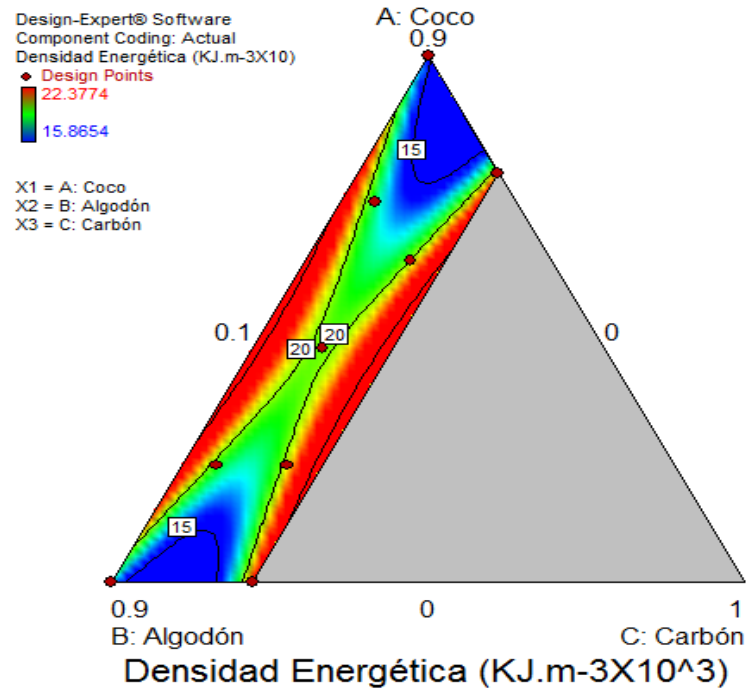


Gráfico 7. Resultados densidad energética.

El gráfico 8 muestra la superficie respuesta del diseño experimental permitiendo observar con mayor detalle las restricciones impuestas a los componentes y como están distribuidos los resultados en la región de experimentación. Los puntos rojos en el gráfico 8 fueron los datos experimentales, a partir de estos el software design expert estima la zonas donde posiblemente están distribuidas las respuestas. Se puede observar que hay una región vacía en la superficie respuesta ya que el carbón se varió entre 10 y 30 %, las zonas marcadas con rojo contienen los valores de densidad energética más altos. La mayor parte de los resultados obtenidos se encuentran en la zona de color verde en donde el contenido de carbón es de aproximadamente de un 15 a 20%



Densidad Energética

$$\begin{aligned}
 &= +37,37535 * Coco + 39,29288 * Algodón + 549,05381 * Carbón \\
 &+ 53,49347 * Coco * Algodón - 807,57743 * Coco * Carbón \\
 &- 808,54465 * Algodón * Carbón
 \end{aligned}$$

Gráfico 8. Superficie respuesta densidad energética.

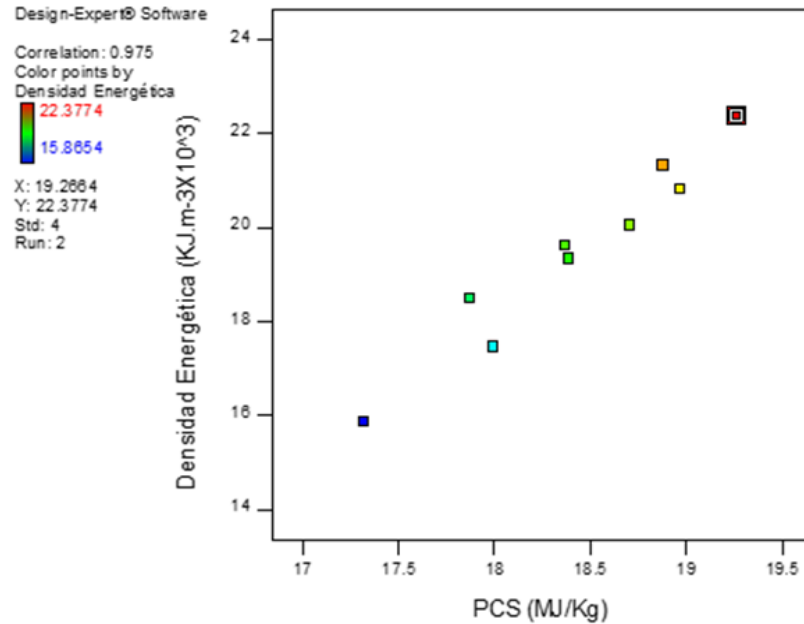


Gráfico 9. Influencia del poder calorífico en la densidad energética

El gráfico 9 muestra la influencia de la densidad energética sobre el poder calorífico superior, este muestra claramente la tendencia ascendente de la densidad energética a medida que aumenta el poder calorífico en los tratamientos, valores superiores a 20000 KJ/m³ (puntos rojos) fueron obtenidos aproximadamente entre 17 y 19,50 MJ/kg

3.2.3. Durabilidad mecánica.

- **Mezclas con aglomerante.**

Los resultados del ensayo de durabilidad realizado a los pellets con aglomerante se resumen en la tabla 10. Estos resultados se pueden observar también con mayor detalle en el gráfico 10. Teniendo en cuenta que para los pellets de coco y algodón puro sin aglomerante también se les calculó el PDI, dando como resultado durabilidades de 98,27 y 97,99% para los residuos de coco y algodón respectivamente, si comparamos estos resultados con los de la tabla 10, se puede determinar que el aumento más representativo

de la durabilidad al mezclar residuos de coco con aglomerante fue de 1,27% utilizando el de maíz, sin embargo este resultado se logró en la más alta concentración de éste. Similarmente al utilizar residuos de algodón, el PDI aumentó en 1,03% cuando se utilizó aglomerante de maíz con una concentración de 30%. A partir de los resultados obtenidos se puede afirmar que no se presentaron mayores aumentos significativos en el PDI que justifiquen la pelletización utilizando estos tipos de aglomerantes.

Tabla 10. PDI pellets de biomasa con aglomerante

Ref. pellets coco	Biomasa % Algodón	Aglome rante %	Tipo aglomerante	PDI	
				coco %	Algodón %
R1	E1	0.9	Yuca	98,532	98,048
R2	E2	0.7	Yuca	98,312	98,264
R3	E3	0.9	Plátano	98,368	98,900
R4	E4	0.7	Plátano	97,956	98,692
R5	E5	0.9	Maíz	99,536	99,024
R6	E6	0.7	Maíz	98,748	98,356

El hecho de que los pellets hecho con 100% presentaran un PDI similar a los pellets de la tabla anterior, se debe a que la biomasa por lo general tiene estructura fibrosa que contiene componentes oleosos o pegajosos que mejoran las propiedades de los aglomerados, por lo que la biomasa puede comportarse como una aglomerante. Kaliyan y Morey (2009) afirman que la lignina en la materia prima actúa como aglomerante, a temperaturas elevadas la lignina se ablanda y ayuda el proceso de densificación.

González et al. (2014) encontró que el contenido de lignina en los residuos de coco, eran de 64.6% y 59.4% para el cuesco y la fibra respectivamente, sus resultados fueron considerablemente mejor a los obtenido por Maheswari et al. (2012), que caracterizó el

Cocos nucifera y encontró 32,2% de lignina. Por otra los residuos de algodón también contienen lignina, aproximadamente el 22% en peso, además de otros componentes menores ceras, grasas, y sales inorgánicas, etc. (Zhao, Li y Sun 2012).

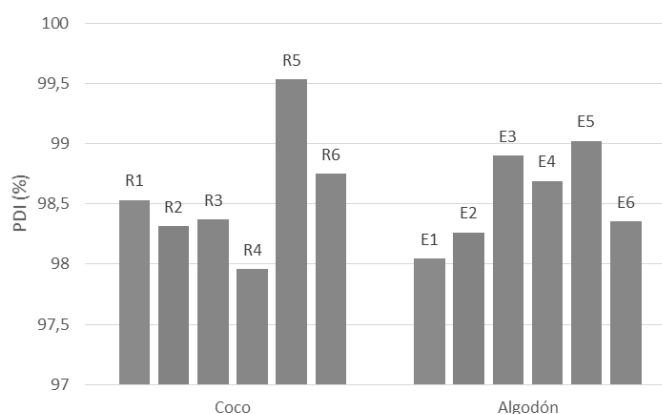


Gráfico 10. PDI pellets de biomasa con aglomerante

En el anexo 4 se muestra los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a los datos de índice de durabilidad para pellets elaborados con coco-aglomerantes. La ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre tratamientos y un componente dentro de los tratamientos. La razón-F, que en este caso fue igual a 2,11903, es el cociente entre los componentes. Puesto que el valor-P de la razón-F fue de 0,1936 mayor que 0,05 permite afirmar que no existe una diferencia estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0% de confianza entre las medias de las 6 mezclas de coco-aglomerantes, esto significa que no existe diferencia significativa al cambiar de aglomerante usando residuos de coco. Al evaluar la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada uno de los 6 tratamientos, el estadístico de Bartlett mostró que el valor-P fue de 1,0 mayor que 0,05 por tanto no existe diferencia estadística entre las desviaciones estándar y los datos son confiables.

En el anexo 5 se muestra los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a los datos de índice de durabilidad para pellets elaborados con Algodón-aglomerantes. Igualmente la ANOVA mostró que estadísticamente no existe diferencia entre las medias de PDI ya que el valor-P de la razón-F fue de 0,4556 mayor que 0,05 y el método de Bartlett mostró que el valor-P fue de 1,0 por ende no existe diferencia estadística entre las desviaciones estándar y los datos son confiables.

- **Mezclas sin aglomerante.**

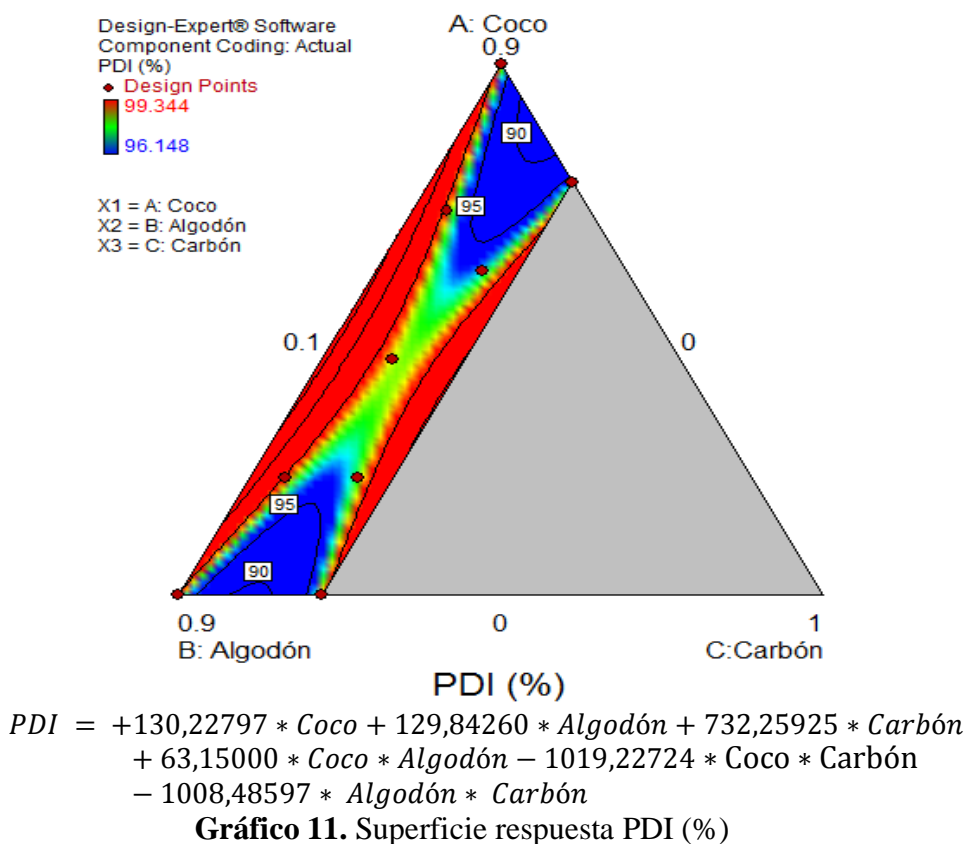
Ya que no se vieron aumentos significativos en la durabilidad con el uso de aglomerantes, se fabricaron pellets sin la adición de éstos variando la concentración de biomasa entre 0 a 90% y carbón mineral entre 10 a 30% y se evaluó como respuesta el índice de durabilidad PDI de los pellets. La tabla 11 muestra los resultados del ensayo.

Tabla 11. PDI pellets de biomasa y carbón sin aglomerante

Mezcla	Durabilidad (%)
M1	98,720
M2	99,340
M3	97,088
M4	98,540
M5	99,164
M6	99,290
M7	96,150
M8	98,560
M9	98,624

El gráfico 11 muestra la superficie respuesta del PDI para pellets biomasa-carbón sin aglomerante, se puede observar que índices de durabilidad se encuentran por encima del 95% en todas las muestras lo que es un indicativo de que los pellets fabricados son de buena calidad, por tanto los mejores resultados se encuentran para los tratamientos con

mayor porcentaje de biomasa como era de esperarse, el tratamiento M7 compuesto por 75% biomasa (55% coco y 20% algodón) y 25% carbón, tuvo el menor PDI de 96,15% si se compara con el PDI de los pellets que contenían aglomerante, R4 (70% coco, 30% aglomerante de plátano) obtuvo el menor valor de 97,95% indicando un aumento de 1.8%. El gráfico 12 muestra el PDI en función del porcentaje de carbón utilizado en los tratamientos, se observó que el carbón influyó el índice de durabilidad, a medida que aumentó su concentración en las muestras el PDI disminuyó los mejores resultados se presentaron para porcentajes de carbón entre 10 y 15%.



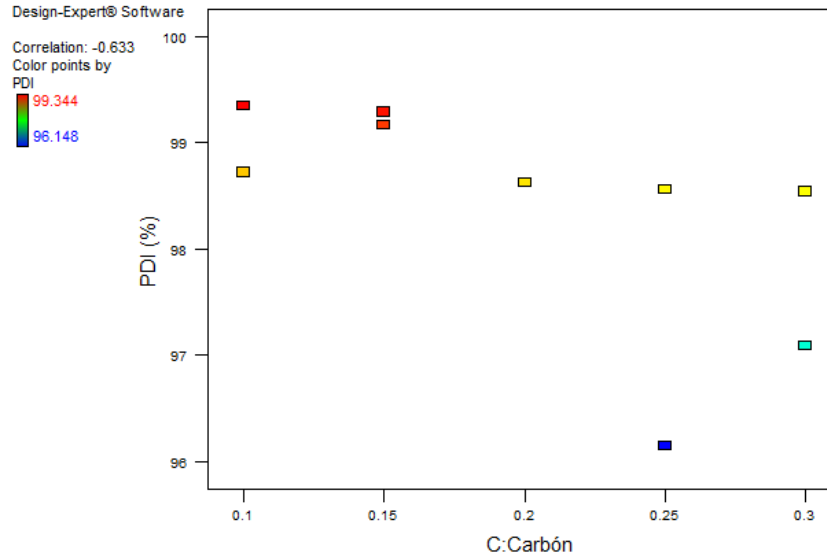


Gráfico 12. Influencia del porcentaje de carbón en el PDI

En el anexo 6 se presenta los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a los datos de índice de durabilidad para pellets elaborados con carbón-biomasa. El análisis ANOVA mostró que existe una diferencia estadísticamente significativa entre los 9 tratamientos con un nivel de confianza de 95%, puesto que el valor-P de la prueba-F fue de 0,0016, menor que 0,05. Para determinar cuáles medias fueron significativamente diferentes de otras, se utilizó el método Turkey que identificó 3 grupos homogéneos cuya clasificación de puede observar en la tabla 10. Los grupos confirman que en el rango de 10 a 20 % de carbón no existe diferencia estadística en el PDI.

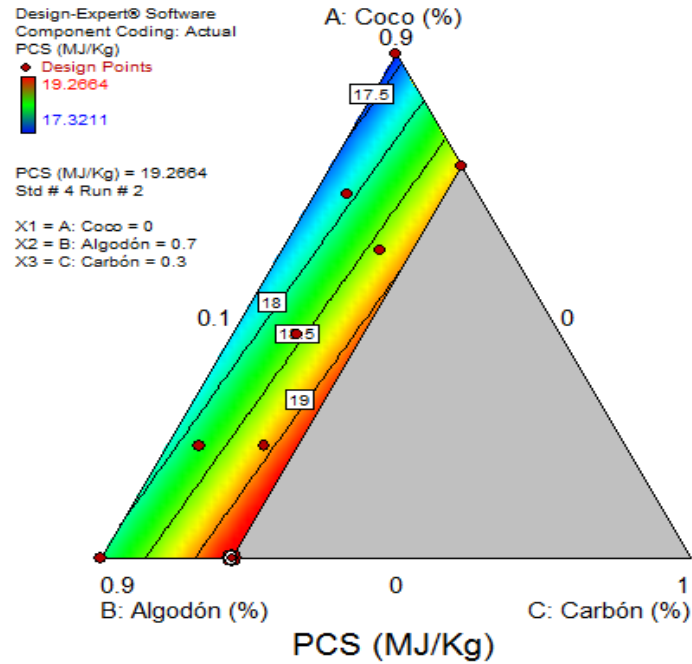
Los datos fueron validados usando el método de Bartlett, que mostro un valor-P de 1,0 mayor que 0,05, por tanto se puede decir que no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza y los datos son confiables.

3.3. ANÁLISIS ENERGÉTICO

En el análisis energético de combustibles densificados, se hace complejo establecer modelos que predigan el comportamiento del combustible, (poder calorífico, material volátil, cenizas etc.) en función de las propiedades de los componentes puros. Sin embargo un correcto diseño de experimentos, puede lograr que un fenómeno de esta naturaleza se describa mediante un modelo de regresión con base a mediciones dentro de los rangos de interés en la zona de operación real del proceso.

Utilizando la metodología de superficie respuesta (MSR), donde las variables fueron las concentraciones de los materiales y las respuestas el poder calorífico superior, contenido de carbono fijo, cenizas y azufre se obtuvieron los siguientes resultados.

El gráfico 13 muestra claramente que los mejores resultados de poder calorífico para las mezclas se encontraron en la zona aladaña (Rojo) a las mayores concentraciones de carbón y de algodón utilizadas, para ver claramente la influencia del carbón en el poder calorífico de las mezclas, en el gráfico 14 se puede observar el comportamiento creciente de esta propiedad, entre 25 y 30% de carbón se encontró poder calorífico superiores a 18,5 MJ/Kg además, el valor máximo encontrado fue de aproximadamente 19,5 MJ/kg para una composición de 30 % de carbón, 70% algodón, 0% coco.



$$PCS = +16,63447 * Coco + 17,37359 * Algodón + 24,07703 * Carbón$$

Gráfico 13. Superficie respuesta Poder calorífico superior

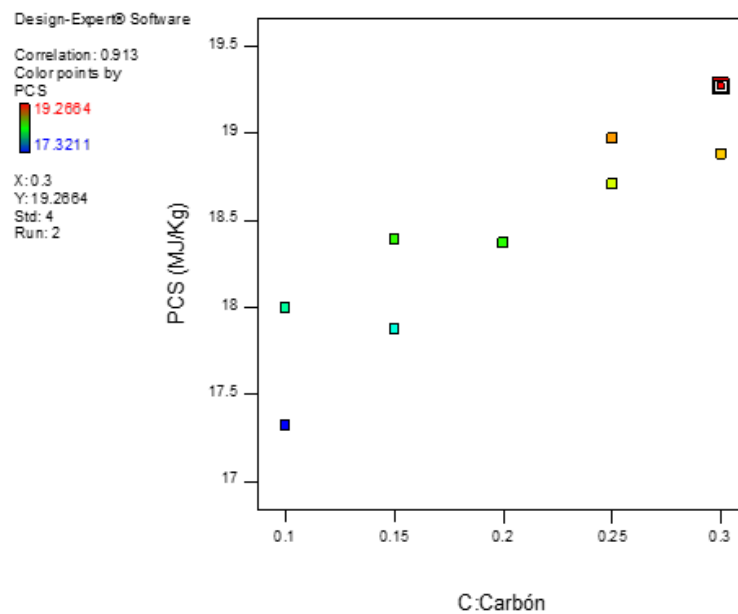


Gráfico 14. Influencia del porcentaje de carbón en PCS

En teoría el porcentaje de cenizas afecta el poder calorífico, en el gráfico 15 se muestra estas dos propiedades de los tratamientos, donde se puede observar que no existió ninguna tendencia marcada entre el porcentaje de cenizas y el PCS. Los mejores resultados de poder calorífico presentaron contenidos de cenizas entre 5,20 y 5,40% correspondientes a M3 y M4 respectivamente.

Aunque todavía son valores altos de cenizas, fueron buenos resultados ya que muestran la posibilidad de utilizar biomasa misturado con carbón como combustible con un poder calorífico superior a 18,5 MJ/Kg y contenidos de ceniza entre 4,6 y 5,4%.

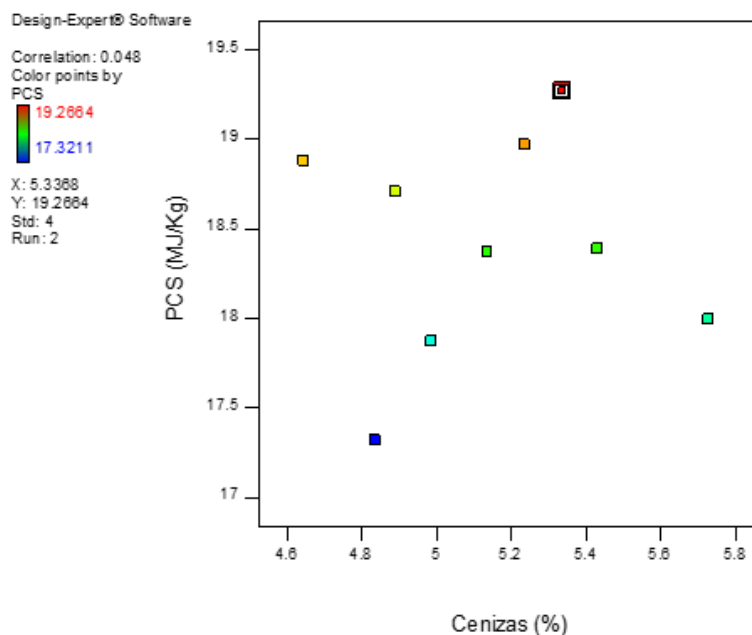
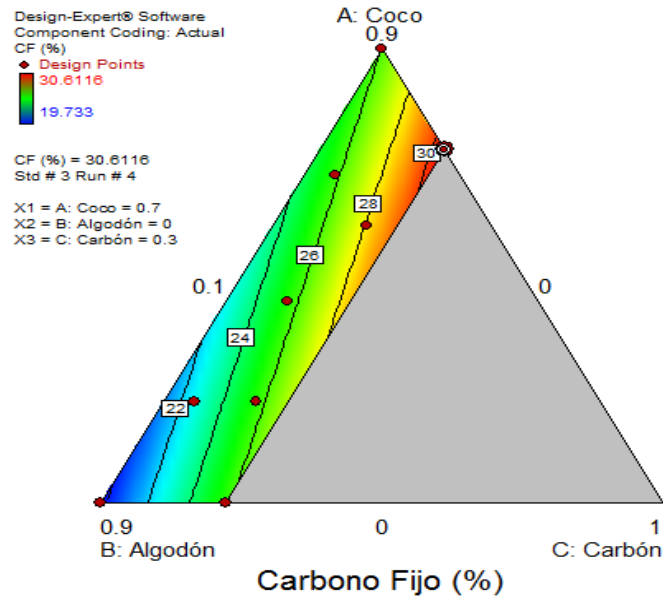


Gráfico 15. Influencia del porcentaje de cenizas en el PCS

La distribución del contenido de carbono fijo en las mezclas se puede apreciar la gráfico 16, el punto marcado corresponde al tratamiento con mayor resultado en esta característica (M3). Contenido de carbono fijo bajo (zona azul), contenido de carbono fijo alto (zona roja), Es decir a medida que aumenta la concentración de algodón en los tratamientos el carbono fijo disminuye contrariamente a media que aumenta la

concentración de carbón y coco el carbono fijo aumenta. En el gráfico 17 se puede observar la tendencia ascendente del carbono fijo con el aumento del carbón mineral sin embargo los valores altos de esta propiedad no significaron valores altos de poder calorífico.



$$CF = +23,741 * Coco + 16,743 * Algodón + 46,643 * Carbón$$

Gráfico 16. Superficie respuesta Carbono fijo.

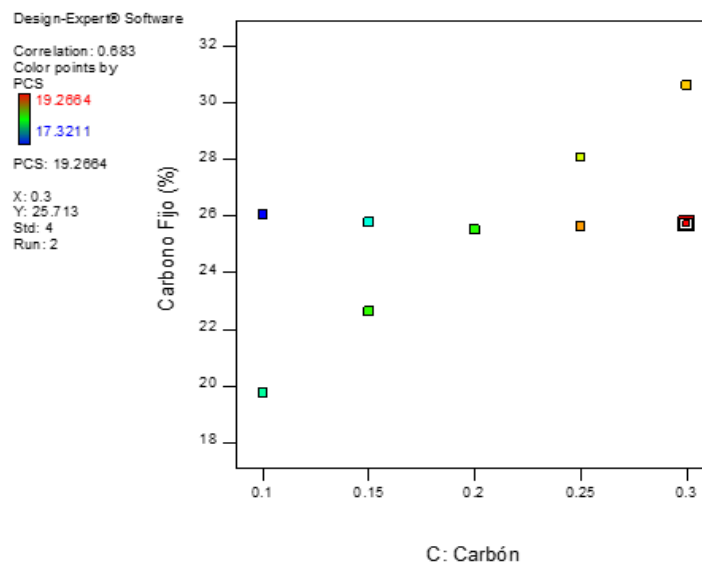
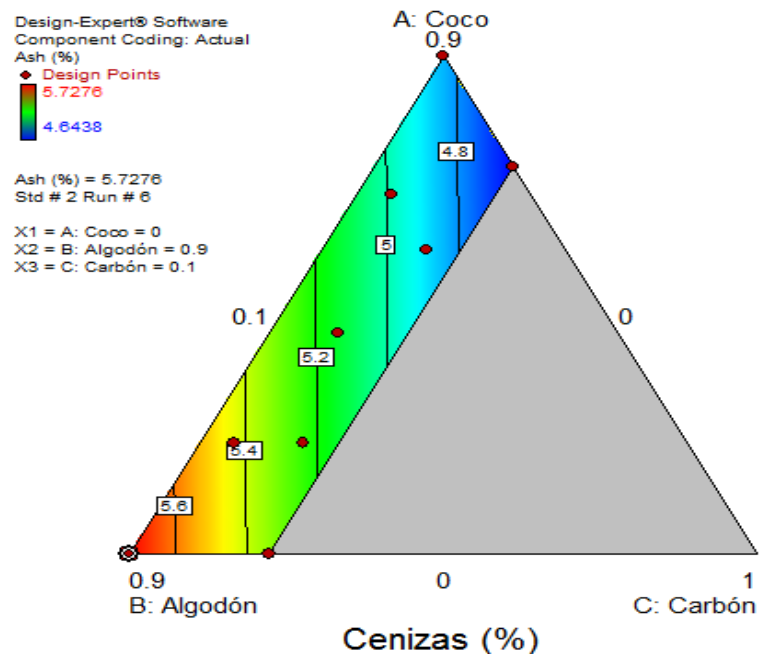


Gráfico 17. Influencia del porcentaje de carbón en el Carbono fijo

El gráfico 18 muestra los resultados de cenizas para los tratamientos, el punto marcado corresponde al tratamiento con mayor contenido de cenizas M2, nótese que la propiedad disminuye de 5,8% a 4,60% al mismo tiempo que aumenta la concentración de coco de 0 a 90% y disminuye la concentración de carbón de 30 a 10%, lo que significa que la adición de fibra de coco en las mezclas para fabricar pellets puede ayudar a controlar el contenido de cenizas en los mismos, característica causante en la corrosión de partes móviles durante la pelletización.

El gráfico 19 confirma las conjeturas antes planteadas, si la fibra de coco incrementa de 0 a 90 % en los pellets esto conduce a una reducción en el contenido de cenizas de 5,8% a 4,6%.



$$\text{Cenizas} = +4,933 * \text{Coco} + 5,923 * \text{Algodón} + 3,969 * \text{Carbón}$$

Gráfico 18. Superficie respuesta Cenizas

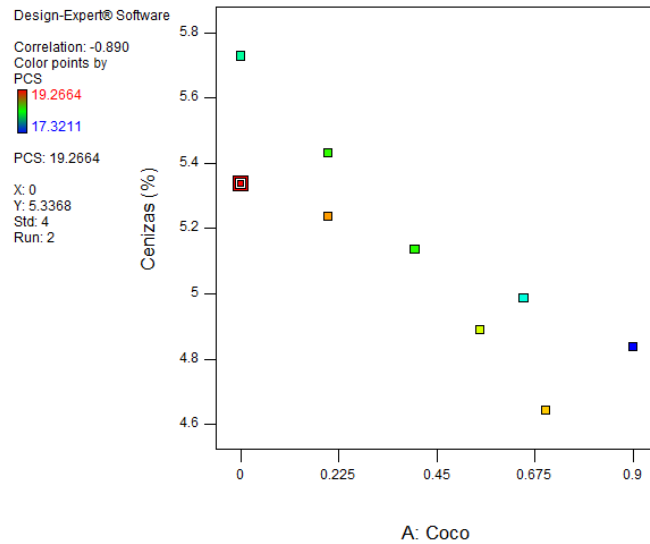
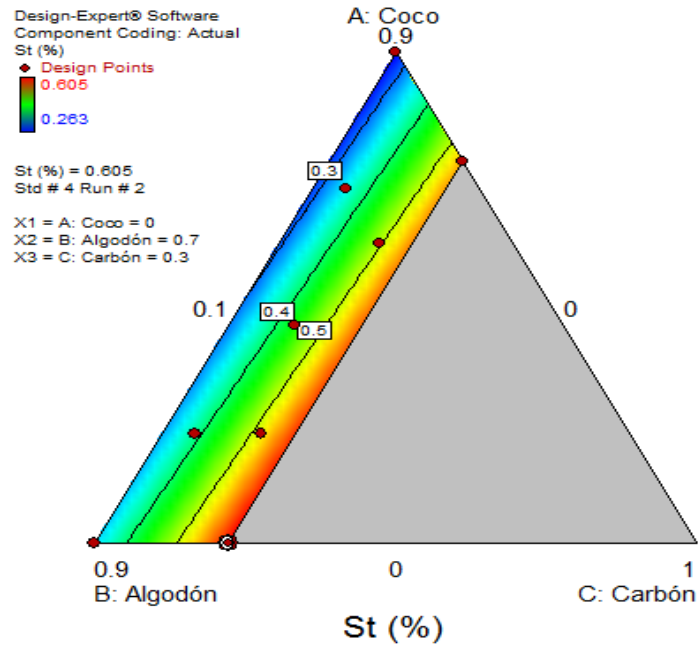


Gráfico 19. Influencia del porcentaje de coco en el contenido de cenizas

El uso del carbón como combustible trae consigo, la problemática ambiental por su alto contenido de azufre, una de las ventajas de la biomasa es precisamente bajo contenido de este componente, el gráfico 20 muestra la distribución del contenido de azufre para los tratamientos estudiados, nótese el mismo comportamiento del contenido de cenizas, es decir la fibra de coco además de ayudar a disminuir el contenido de cenizas como se mencionó en el análisis anterior, también disminuye el contenido de azufre. En las mezclas estudiadas se logró obtener un máximo contenido de azufre de 0,605% en el tratamiento M4, es decir la mezcla compuesta por 70% biomasa, 30% carbón, comparando este valor con contenido de azufre en el carbón que es de 1,55% se logra una disminución en al menos un 60,96% lo cual es una diferencia muy significativa si se tiene en cuenta el aspecto ambiental, y de esta manera se logra estar dentro del rango estipulado por la norma ya que no se supera el 1% de contenido de azufre en masa.



$$St = +0,120 * Coco + 0,200 * Algodón + 1,550 * Carbón$$

Gráfico 20. Superficie respuesta Azufre total

El gráfico 21, muestra la tendencia ascendente que presenta el contenido de azufre a medida que aumenta el uso del carbón mineral en los tratamientos, emplear de 10 a 30% carbón genera pellets con contenido de cenizas entre 0,2 y 0,6%

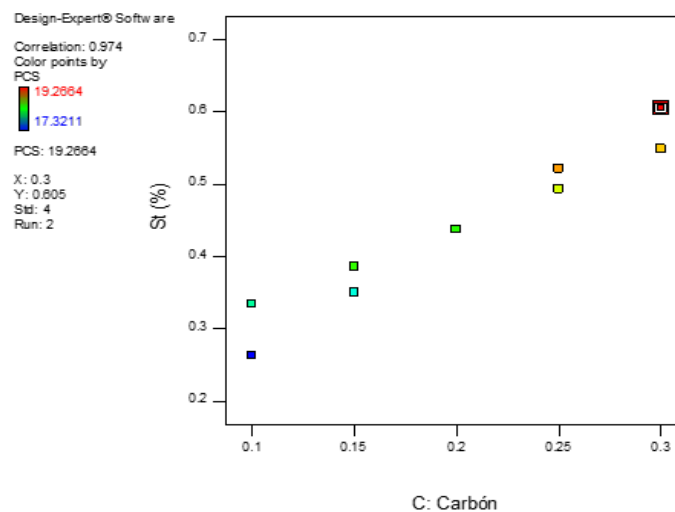


Gráfico 21. Influencia del porcentaje de carbón en el contenido de azufre

3.3.1. Optimización de las mezclas.

Se pretendió encontrar entre los límites estudiados la mezcla más favorable, que dieran como resultados el máximo poder calorífico, y de carbono fijo, mínimo contenido de cenizas y azufre. Después de programar los criterios de optimización (Tabla 5, sección 2.9.1) se encontraron 3 resultados que cumplen las condiciones planteadas, con poca diferencia entre ellos, el primer resultado presentó una mayor deseabilidad por tanto se eligió como respuesta óptima. La Tabla 12 muestra los resultados de la optimización.

Tabla 12. Resultados de la optimización.

Respuesta	Coco (%)	Algodón (%)	Carbón (%)	PCS (MJ/Kg)	CF (%)	Cenizas (%)	Azufre (%)	Deseabilidad
1	51,8	35,7	12,5	17.825	24.095	5.166	0.327	0.287
2	51,6	38,4	10,0	17.663	23.344	5.217	0.294	0.279
3	45,0	45,0	10,0	17.711	22.882	5.282	0.299	0.275

El gráfico 22. Muestra los resultados y su ubicación en la región estudiada, se puede apreciar que aunque la respuesta 1 presentó el mayor poder calorífico de 17,825 MJ/Kg, la respuesta 2 presentó el menor porcentaje de azufre 0,294 % lo que significa que la mezcla 51,6% coco, 38,4% algodón, 10% carbón responderá mejor a la problemática ambiental. Por otra parte también se encontró que las dos primeras respuestas que se ajustaron a los criterios de optimización contienen mayor porcentaje de fibra de coco que de algodón.

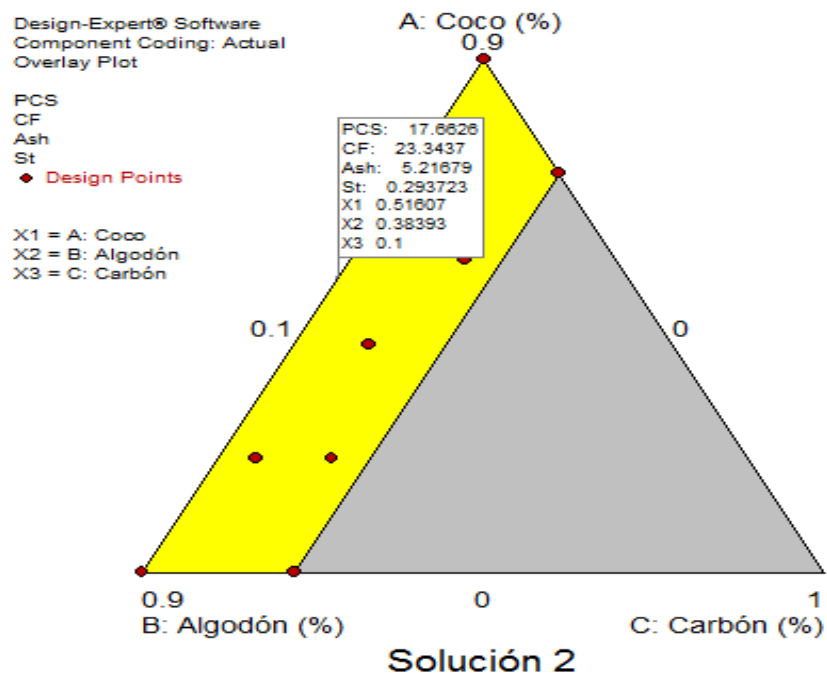
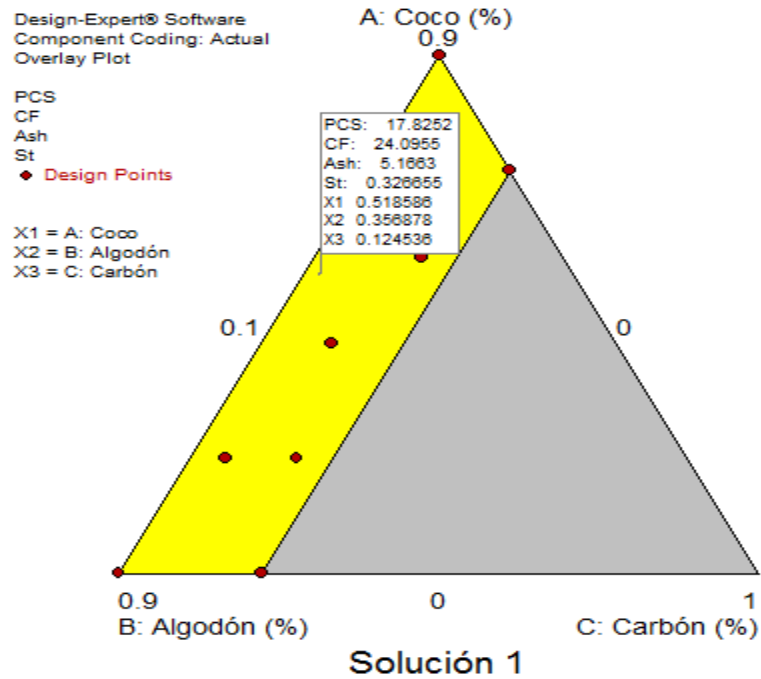


Gráfico 22. Resultados de optimización y ubicación en la región estudiada

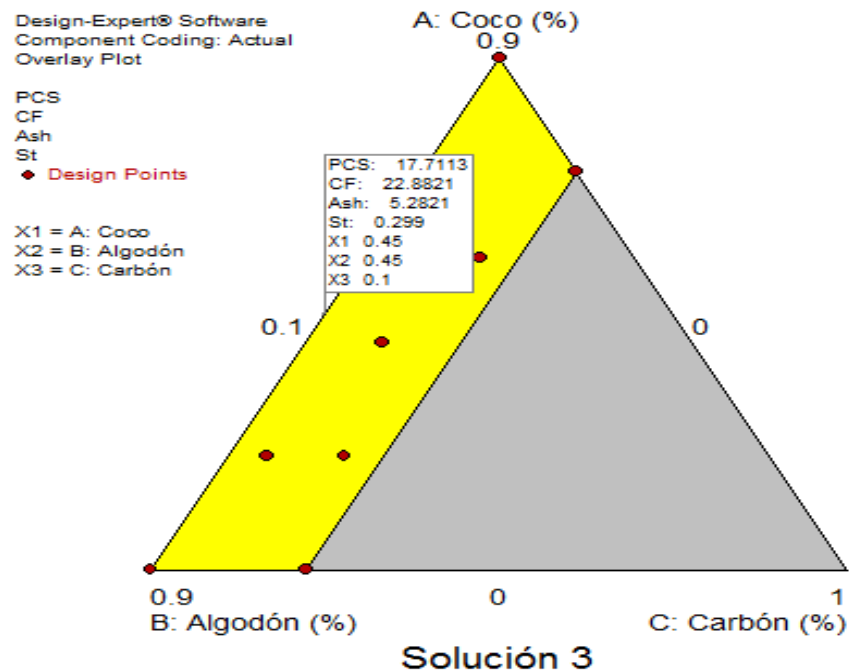


Gráfico 23. Resultados de optimización y ubicación en la región estudiada

(continuación)

4. CONCLUSIONES

Se puede concluir que los residuos de coco y algodón pueden ser utilizados en la fabricación de pellets, los resultados evidencian que las biomásas estudiadas presentan características energéticas adecuadas y en ensayo de durabilidad simulan adecuadamente el comportamiento de las pellets durante la manipulación o transporte.

Fue posible la fabricación de pellets utilizando fibra de coco, residuos de algodón y carbón mineral sin la adición de aglutinante, logrando la utilización de todas las granulometrías presentes en los residuos. A partir de la evaluación del PDI para aglomerados fabricados con aglomerantes se pudo comprobar que no se presentaron aumentos significativos en esta propiedad que justifiquen la pelletización utilizando los tipos de aglomerantes (yuca, plátano y maíz) estudiados.

Fue posible simular el secado de la biomasa utilizando el túnel de aire, los resultados mostraron que la fibra de coco presentó más tiempo para alcanzar la humedad de equilibrio que los residuos de algodón lo cual se debe a que la fibras de coco al presentar una estructura porosa muestra una tendencia a la ganancia de mayor humedad en comparación con los residuos de algodón. Además al secar residuos al aire libre se

presentaran más pérdida para los residuos de algodón que para la fibra de coco por causa del flujo natural del aire en espacios libres.

Los resultados de análisis próximo y elemental mostraron que el carbón mineral presentó mejores propiedades energéticas que la biomasa, en donde el contenido de cenizas fue aproximadamente de 3,69%. Las muestras de biomasa presentaron un contenido de cenizas más alto que el carbón, 4,93 para el coco y 5,92 para el algodón, lo cual provoca un mayor contenido de residuos luego de un proceso de combustión. Por otra parte el carbón presentó un contenido de azufre de 1,55% y carbón fijo de 46,6%, por el contrario las biomásas presentaron contenidos de azufre menores al 0,2% y carbono fijo de 16,7 y 23,7% para el algodón y coco respectivamente.

Para las mezclas biomasa-carbón se comprobó el aumento en el poder calorífico conforme aumentó el porcentaje de carbón en los tratamientos, M1 90% fibra de coco y 10% de carbón mineral, fue el tratamiento que presentó el menor poder calorífico de 17,322 MJ/Kg. El incremento del poder calorífico con el aumento del contenido de carbón en los tratamientos se debió porque este material presentó el poder calorífico más alto entre los componentes individuales de las mezclas. M4 70% coco y 30% carbón, fue el tratamiento con mayor poder calorífico, este resultado es mayor que el poder calórico del coco y el algodón puros, es decir la adición de carbón mineral mejoró esta característica de 17,32 MJ/Kg a 19,26 MJ/Kg.

El análisis energético utilizando diagramas de contorno (MSR) permitió observar el comportamiento de las propiedades en la región de experimentación, con esta

metodología se pudo explicar que la fibra de coco además de ayudar a disminuir el contenido de cenizas de 5,8% a 4,60%, también disminuye el contenido de azufre, se logró obtener un máximo contenido de azufre de 0,605% en el tratamiento M4, este resultado representa una disminución en el porcentaje total de azufre alrededor de un 61%, en comparación con el carbón mineral en estado puro.

Al optimizar los resultados de análisis energético se encontraron 3 resultados con el máximo poder calorífico, máximo contenido de carbono fijo, mínimo contenido de cenizas y azufre posible, de los tres resultados obtenidos se seleccionó la mezcla con mayor deseabilidad compuesta por 51,8% coco, 35,7% algodón y 12,5% de carbón, con la cual se obtiene como respuesta un PCS de 17,8% MJ/Kg, 24,1% de carbono fijo, 5,16% de cenizas y 0,32% de azufre.

5. BIBLIOGRAFÍA.

- ASTM, D3173 – 11, Standard test method for Moisture in the analysis sample of coal and coke. Annual Book of ASTM Standards, 1-2, (2011a).
- ASTM, D3175 – 11, Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke. Annual Book of ASTM Standards, 1-3, (2011b).
- ASTM, D3174 – 12, Standard test method for Ash in the analysis sample of coal and coke from coal. Annual Book of ASTM Standards, 1-4, (2012)
- ASTM, D3172 – 13, Standard practice for Proximate analysis of coal and coke. Annual Book of ASTM Standards, 1-2, (2013a).
- ASTM, E11 – 13, Standard specification for Woven wire test sieve cloth and test sieves, Annual Book of ASTM Standards, 1-3, (2013b).
- ASTM, D5865 – 13, Standard test method for Gross calorific value of coal and coke. Annual Book of ASTM Standards, 2-9. (2013b).
- ASTM, D3176 – 15. Standard practice for ultimate analysis of coal and Coke1, Annual Book of ASTM Standards ASTM International, 1-2. (2015).
- ASABE Standards. S269.4: Cubes, pellets, and crumbles – definitions and methods for determining density, durability, and moisture content. St. Joseph, MI: ASABE; 2003.

- AENOR. (2010). Biocombustibles sólidos. determinación de la densidad a granel. [Solid biofuels - Determination of bulk density] Asociacion Española De Normalizacion Y Certificacion UNE-EN 15103:2010, 9-10.
- Álvarez A, A., & Álvarez V, J. (2010). Diseño e implementación de un sistema de control para secador de alimentos del laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad pontificia Bolivariana Seccional montería, mediante el uso de un controlador siemens s7-200 y sistema scada wincc. Unpublished Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería, Montería - Córdoba.
- ALBUQUERQUE, C. E. C.; ANDRADE, A. M. Visão histórica e perspectiva futura. Floresta e Ambiente. Rio de Janeiro, v. 4, p. 104 – 109, 1997.
- Bapat DW, Kulkarni SV and Bhandarkar VP, Design and operating experience on fluidized bed boiler burning biomass fuels with high alkali ash, in Proceedings of the 14th International Conference on Fluidized Bed Combustion, ed by Preto FDS. ASME Publishers, New York, USA, pp. 165–174 (1997).
- BUN-CA, U. (2002). Manuales sobre energía renovable: Biomasa.
- CAMPBELL, C. J.(2006) O Brasil e o fim da era do petróleo. Veja, São Paulo, 20.12.
- Coates, W. (2001). Using cotton plant residue to produce briquettes. Biomass and Bioenergy, 18(3), 201-208.
- Corradini, E., Rosa, M., Macedo, B., Paladin, P., y Mattoso, L., Composição química, propriedades mecânicas e térmicas da fibra de frutos de cultivares de coco verde. Revista Brasileira de Fruticultura, ISSN: 1806-9967 (en línea), 31(3), 2009, <http://www.rbf.org.br/>.

- Chou, C., Lin, S., & Lu, W. (2009). Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran. *Fuel Processing Technology*, 90(7–8), 980-987.
- Coates, W. (2000). Using cotton plant residue to produce briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 18(3), 201-208.
- Cornell J. A. (2002) *Experiments with Mixtures: Design, Models and the Analysis of Mixtures* 3 rd Ed. New York&Sons
- DANE. (2012). Encuesta Nacional Agropecuaria. Recuperado de http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/enda/ena/cp_ena_2012.pdf
- DANE. (2014). Encuesta Nacional Agropecuaria. Recuperado de http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuaria/enda/ena/2014/boletin_ena_2014.pdf
- Estrada, C., & Meneses Z, A. (2004). Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor. *Scientia Et Technica*, 2(25), 4-5.
- Floresta e Ambiente. Rio de Janeiro, v. 4, p. 104 – 109, 1997.
- Felisart Serlavóss, B. (2014). Simulación fluido-térmica de un reactor de gasificación de lecho fijo descendente fabricación de pellets, *Revista Avances Investigación en Ingeniería*, universidad libre, ISSN: 1794-4953 (en línea), 11(1), 2014. <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/>.
- González, Y., Rincón, S., Camargo, G., Dévora, G., y Sierra, F., Caracterización de Materiales lignocelulósicos residuales de palma de aceite y palma de coco para la

- Holt, G. A., Blodgett, T. L., & Nakayama, F. S. (2006). Physical and combustion characteristics of pellet fuel from cotton gin by-products produced by select processing treatments. *Industrial Crops and Products*, 24(3), 204-213.
- ICER. (2012). Informe de Coyuntura Económica Regional Departamento de Córdoba.Montería.
- Corpoica, & CVS. (2009). Buenas prácticas agrícolas para el Cultivo del Algodón en el Departamento de Córdoba. montería : Produmedios.
- Jiménez, J. L. (2014). Pellets: Energía Limpia con Buen Futuro. *Revista M&M*, 83, 76-84.
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337-359.
- Maheswari C., Reddy O., Muzenda E., Guduri B., Rajulu A. (2012). Extraction and characterization of cellulose microfibrils from agricultural residue e Cocos nucifera. *Biomass and bioenergy*, 44, 555-563.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006a). Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass and Bioenergy*, 30(7), 648-654.
- Mani, S., Tabil, L. G., & Sokhansanj, S. (2006b). Specific energy requirement for compacting corn stover. *Bioresource Technology*, 97(12), 1420-1426.
- Mincomercio. (2010). Mincomercio Sector Agrícola, Departamento de Córdoba. Oficina de Estudios Económicos. Montería
- MONTGOMERY, D. C. Design and Analysis of Experiments. 7th Edition, John Wiley and Sons, 2008.

- Nova, V., Mendoza, J., Gómez, R., & Verdeza, A. (2013). Elaboración de aglomerados de carbón y residuos de cosecha de maíz (tusa) como combustible sólido para uso industrial y doméstico. *Universitas Científica*, 16(2), 62-65.
- Ortíz Torres, L. (2008). Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España. España.
- Rhén, C., Öhman, M., Gref, R., & Wästerlund, I. (2007). Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 31(1), 66-72.
- Pineda, G. A. C., Godoy, M. A. M., & Herrera, C. X. M. (2011). Influencia de la concentración de hierro y pH iniciales en un proceso de biodesulfurización de carbón—ensayos a nivel de laboratorio. *Revista Colombiana De Biotecnología*, 13(2), 199-209.
- SANCHÉZ, C. G. *Tecnologia da Gaseificação de Biomassas*. 429p. Ed. Átomo Campinas. 2010.
- S. Yaman, M. Şahan, H. Haykırı-Acıma, K. Şesşen, S. Ku'c, u'kbayrak, Production of fuel briquettes from olive refuse and paper mill waste. *Fuel Processing Technology* 68 2001. 23–31.
- SPIRO, T. G.; STIGLIANI, W. M. *Química Ambiental*. 2. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2009.
- Thompson W.O. y Miers R.H. (1968) “Response Surface for Experiments with Mixtures” *Technometrics* Vol 10. pp: 739- 755
- Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964-972.

- Tripathi, A., Iyer, P., Kandpal, T. 1998. A techno-economic evaluation of biomass briquetting in India, *Biomass and Bioenergy* 14(5): 479-488.
- Torres Luis Ortiz. (2008) Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España, tesis Universidad de Vigo E.U.I.T. Forestal Campus A Xunqueira, s/n 36005 Pontevedra. España
- Tukey, J. W. (1949). Comparing individual means in the analysis of variance, *Biometrics*, 5(2), p99-114.
- UPME. (2005, La cadena del carbón en colombia., 23-25. Retrieved from http://www.upme.gov.co/Docs/Cadena_carbon.pdf
- Vieira, de Castro A. F., & Dal Bello, L. H. A. (2006) experimentos com mistura para otimização de processos: uma aplicação com respostas não normais, *Pesquisa Operacional*, v.26, n.3, p.605-623
- Wilaipon, P. (2008). Density equation of bio-coal briquettes and quantity of Maize cob in phitsanulok, thailand. [Densidad Ecuación de Bio-carbón Briquetas y cantidad de maíz Mazorca en Phitsanulok, Tailandia] *American Journal of Applied Sciences*, 5(12), 1808-1811.
- Winowiski T. Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best? *Feed Management* 1998; 49:23–6.
- Yin, C. (2011). Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses. *Fuel*, 90(3), 1128-1132.
- Zhao, L., Li, L., & Sun, C. (2012). The effect of degumming process on cotton stalk peel fiber. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 26(2), 158– 160

ANEXOS

Anexo 1. Estadística para la densidad a granel.

Tabla ANOVA datos densidad a granel

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,0145541	8	0,00181926	15,40	0,0002
Intra grupos	0,0010635	9	0,000118167		
Total (Corr.)	0,0156176	17			

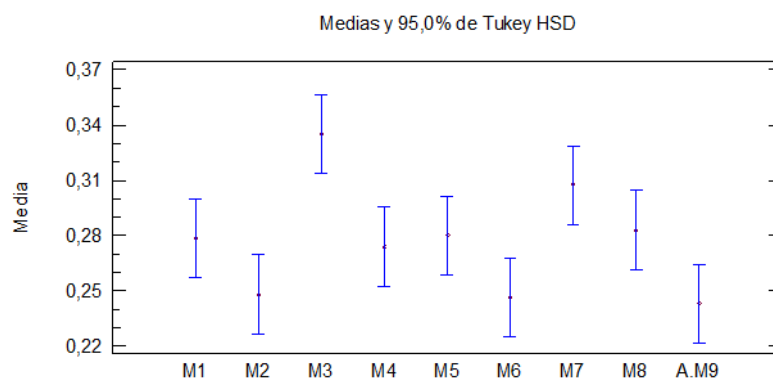
Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
M9	2	0,243	a
M6	2	0,2465	a
M2	2	0,248	a
M4	2	0,274	ab
M1	2	0,2785	ab
M5	2	0,28	ab
M8	2	0,283	ab
M7	2	0,3075	bc
M3	2	0,335	c

Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
de Bartlett	2,85599	0,548316



Comparación de medias para la densidad a granel

Anexo 2. Estadística para la densidad a aparente.

Tabla ANOVA datos densidad aparente

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	0,462894	8	0,0578617	13,57	0,00001
Intra grupos	0,345414	81	0,00426437		
Total (Corr.)	0,808308	89			

Pruebas de Múltiple Rangos

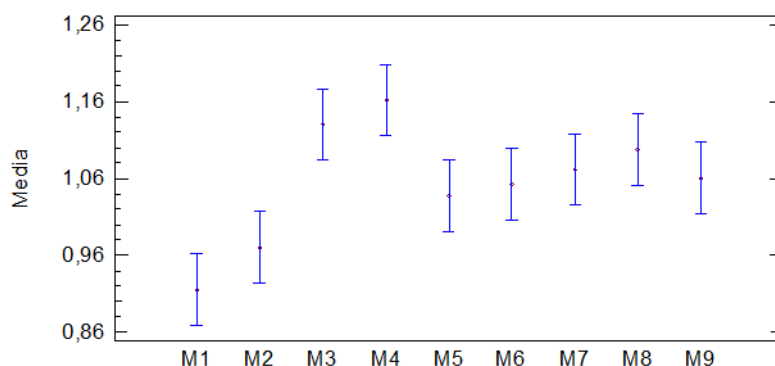
Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
M1	10	0,9159	a
M2	10	0,9710	a
M4	10	1,1614	b
M3	10	1,1290	bc
M5	10	1,0349	c
M6	10	1,0508	c
M7	10	1,0711	c
M8	10	1,0976	c
M9	10	1,0681	c

Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
de Bartlett	1,90942	0,06964

Medias y 95,0% de Tukey HSD



Comparación de medias para la densidad aparente.

Anexo 3. Estadística para el poder calorífico

Tabla ANOVA para datos de poder calorífico

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	6,00102E6	8	750128,	18,24	0,0001
Intra grupos	370160,	9	41128,9		
Total (Corr.)	6,37118E6	17			

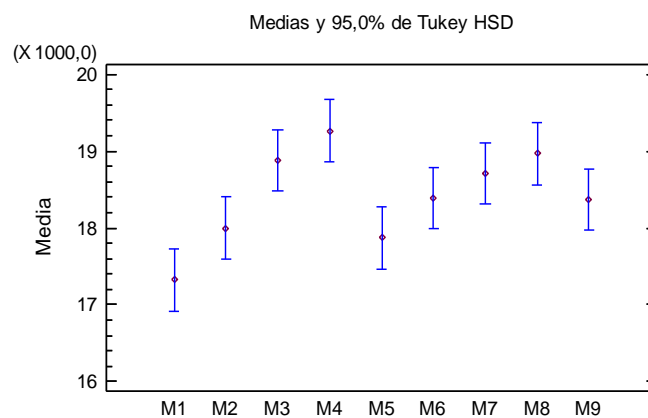
Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje Tukey HSD

	<i>Casos</i>	<i>Media</i>	<i>Grupos Homogéneos</i>
M1	3	17321,0	a
M5	3	17872,5	ab
M2	3	17995,5	abc
M9	3	18368,5	bcd
M6	3	18387,5	bcd
M7	3	18707,0	cde
M3	3	18879,0	de
M8	3	18968,0	de
M4	3	19266,0	e

Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
de Bartlett	1,1729	0,99793



Comparación de medias para poder calorífico.

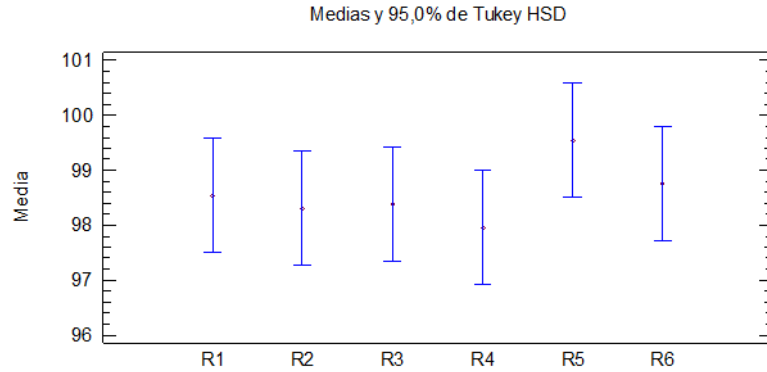
Anexo 4. Estadística para el índice de durabilidad mecánica coco y aglomerante.

Tabla ANOVA datos PDI Coco-Aglomerante

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	2,90095	5	0,580191	2,12	0,1936
Intra grupos	1,6428	6	0,2738		
Total (Corr.)	4,54375	11			

Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
de Bartlett	1,0	1,0



Comparación de medias PDI pellets de coco y aglomerante

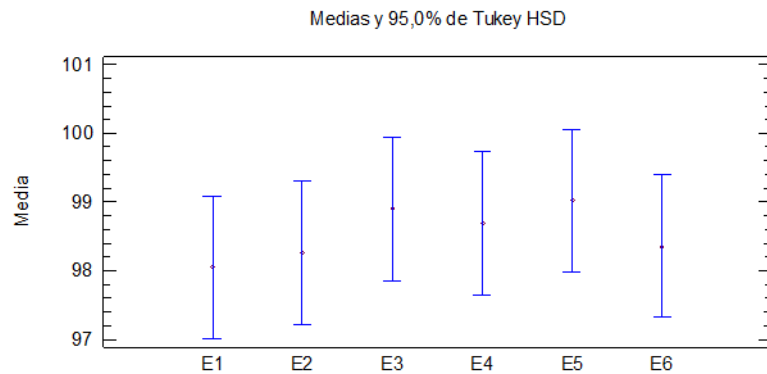
Anexo 5. Estadística para el índice de durabilidad mecánica algodón y aglomerante

Tabla ANOVA datos PDI Algodón-Aglomerante

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	1,47747	5	0,295493	1,08	0,4556
Intra grupos	1,6428	6	0,2738		
Total (Corr.)	3,12027	11			

Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
de Bartlett	1,0	1,0



Comparación de medias PDI pellets de algodón y aglomerante

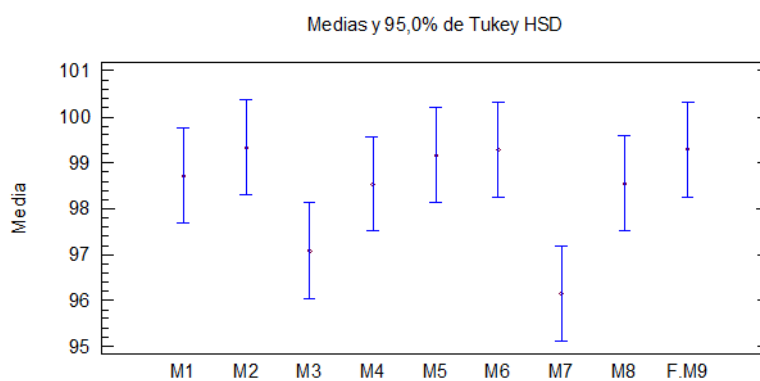
Anexo 6. Estadística para el índice de durabilidad mecánica carbón- biomasa.

Tabla ANOVA datos PDI Carbón-biomasa

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Entre grupos	19,9199	8	2,48999	9,09	0,0016
Intra grupos	2,4642	9	0,2738		
Total (Corr.)	22,3841	17			

Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>
de Bartlett	1,0	1,0



Comparación de medias PDI pellets de biomasa y carbón